

SIMONE DA SILVA SORIA MEDINA

ANÁLISE DE PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS PARA CADASTRAMENTO DE MONUMENTOS ARQUITETÔNICOS

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação
em Ciências Geodésicas, do Setor de Ciências
da Terra, da Universidade Federal do Paraná,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Doutor.

Orientadores: Prof. Dr. Quintino Dalmolin
Prof. José Bittencourt de
Andrade, Ph.D.

CURITIBA

2002

Soria Medina, Simone da Silva

Análise de produtos fotogramétricos para cadastramento de monumentos arquitetônicos / Simone da Silva Soria Medina. — Curitiba, 2002.

xvii, 131 f. : il.; grafs.; tabs.

Orientador: Quintino Dalmolin, José Bittencourt de Andrade
Tese (doutorado) — Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra.

1. Fotogrametria. 2. Monumentos — Preservação. I. Dalmolin, Quintino. II. Andrade, José Bittencourt de. III. Título.

Termo livre: Fotogrametria arquitetônica.

CDD 20. 526.982

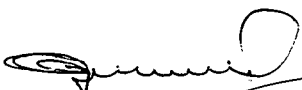
“ANÁLISE DE PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS PARA CADASTRAMENTO DE MONUMENTOS ARQUITETÔNICOS”

POR


SIMONE DA SILVA SORIA MEDINA

Tese nº 024 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade
Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

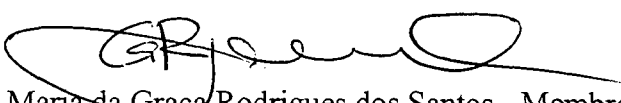
Curitiba, 30 de julho de 2002.



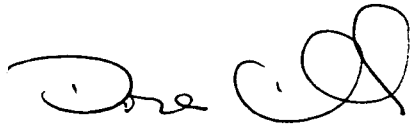
Prof. Dr. Quintino Dalmolin - Orientador e Presidente (UFPR)



Prof. Dr. Key Imaguiri Junior – Membro (UFPR)



Prof.ª Dr.ª Maria da Graça Rodrigues dos Santos - Membro (UTP)



Prof.ª Dr.ª Dora Maria Orth - Membro (UFSC)



Prof. Dr. Flávio Felipe Kirchner – Membro (UFPR)



Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita - Membro (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade e disponibilização dos recursos necessários à execução deste trabalho.

Aos professores Quintino Dalmolin e José Bittencourt de Andrade pela orientação, apoio e principalmente pelo incentivo e confiança em mim depositados.

À Mônica, pelo atendimento junto à Secretaria do Curso, como também pela sua amizade.

A todos os colegas e professores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, pela oportunidade de discussão de assuntos pertinentes ao trabalho e pela troca de idéias que permitiram concluir este trabalho.

Às empresas Engefoto e Geokosmos por disponibilizarem equipamentos, pessoal e programas utilizados na parte experimental deste trabalho.

Aos meus pais, Jordão e Iracema, pelo incentivo, estímulo e principalmente pelo apoio ao cuidarem da minha filha.

Ao Alex, por todo carinho, paciência e incentivo nas horas em que eu precisei.

À Ana Paula, pela sua alegria.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xv
RESUMÉN	xvi
ABSTRACT	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 ESTRUTURA E CONTEÚDO.....	3
2 CADASTRAMENTO DE MONUMENTOS HISTÓRICOS.....	5
2.1 PRESERVAÇÃO DE MONUMENTOS HISTÓRICOS.....	5
2.1.1 Levantamento Gráfico de Monumentos Históricos	6
2.1.2 Levantamento Gráfico Tradicional.....	7
2.2 FOTOGRAMETRIA ARQUITETÔNICA.....	8
2.3 PATRIMÔNIO HISTÓRICO BRASILEIRO	12
2.3.1 Fotogrametria Arquitetônica no Brasil	13

2.4 ESTADO DA ARTE DA FOTOGRAMETRIA ARQUITETÔNICA.....	15
2.5 A FOTOGRAFIA COMO FONTE DE DADOS PARA LEVANTAMENTOS ARQUITETÔNICOS.....	19
3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE FOTOGRAMETRIA PARA LEVANTAMENTOS ARQUITETÔNICOS.....	21
3.1 IMAGEM FOTOGRÁFICA.....	21
3.2 SISTEMAS DE COORDENADAS	22
3.2.1 Referencial Instrumental	23
3.2.2 Referencial Fiducial.....	24
3.2.3 Referencial Fotogramétrico	25
3.3 EQUAÇÕES DE COLINEARIDADE	26
3.4 PONTOS DE APOIO	30
3.5 CÂMERAS FOTOGRAMÉTRICAS	31
3.5.1 Calibração de Câmeras.....	32
3.6 FOTOTRIANGULAÇÃO	35
3.7 RESTITUIÇÃO FOTOGRAMÉTRICA	35
3.8 RETIFICAÇÃO DE IMAGENS.....	39
3.8.1 Ortofoto	40
3.9 GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE	41
3.9.1 Obtenção das Informações	42
3.9.2 Elaboração do Modelo	43
3.9.3 Aplicação do Modelo	44
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	45

4.2 MONUMENTO TESTE.....	46
4.3 LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE APOIO.....	48
4.3.1 Cálculo das Coordenadas.....	51
4.4 TOMADA DAS FOTOGRAFIAS.....	57
4.4.1 Digitalização das Fotografias.....	59
4.5 LEITURA DE COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS.....	60
4.5.1 Correção do Trabalho do Filme.....	61
4.6 PROCESSAMENTO DA FOTOTRIANGULAÇÃO.....	66
4.7 ELABORAÇÃO DOS PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS.....	67
4.7.1 Estereorestituição Digital.....	67
4.7.1.1 Pontos de Referência para Geração do MDS.....	68
4.7.2 Monorestituição.....	69
4.7.3 Fotografia Retificada.....	71
4.7.4 Ortofoto Digital.....	74
4.8 COMPARAÇÃO DOS PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS.....	76
5 RESULTADOS E ANÁLISES.....	78
5.1 COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO.....	78
5.1.1 Análise dos Métodos de Cálculo.....	81
5.1.2 Análise dos Equipamentos Topográficos.....	83
5.2 ANÁLISE DA FOTOTRIANGULAÇÃO.....	85
5.2.1 Parâmetros de Calibração da Câmera.....	85
5.2.2 Resultados do Processamento da Fototriangulação.....	86
5.2.3 Análise da Variância a Posteriori.....	92
5.2.4 Análise dos Transformações utilizadas na Correção do Trabalho do Filme.....	94

5.2.5 Análise dos Pontos de Referência utilizados na determinação dos Parâmetros das Transformações.....	97
5.3 COORDENADAS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO.....	100
5.3.1 Análise da Estereorestituição.....	105
5.3.2 Análise da Monorestituição	108
5.3.3 Análise da Fotografia Retificada	111
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	118
6.1 CONCLUSÕES QUANTO AOS PONTOS DE CONTROLE.....	118
6.2 CONCLUSÕES QUANTO À FOTOTRIANGULAÇÃO	119
6.3 CONCLUSÕES QUANTO AOS PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS.....	120
6.3.1 Estereorestituição Digital.....	120
6.3.2 Monorestituição Digital.....	121
6.3.3 Fotografia Retificada	121
6.3.4 Ortofoto Digital	122
6.4 RECOMENDAÇÕES QUANTO AO CADASTRAMENTO DE MONUMENTOS HISTÓRICOS.....	122
6.4.1 Considerações Preliminares	122
6.4.2 Produto Fotogramétrico.....	123
6.5 RECOMENDAÇÕES À INVESTIGAÇÕES CIENTÍFICAS	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
ANEXO - GLOSSÁRIO FOTOGRAMÉTRICO.....	129

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DAS ATIVIDADES DE UM LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO	11
FIGURA 2 - ESTRUTURA RASTER	22
FIGURA 3 - REFERENCIAL INSTRUMENTAL NUM MONOCOMPARADOR.....	23
FIGURA 4 - SISTEMA DE COORDENADAS DO REFERENCIAL INSTRUMENTAL COM REFLEXÃO EM Y	24
FIGURA 5 - SISTEMA DE COORDENADAS FIDUCIAIS.....	24
FIGURA 6 - SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO.....	25
FIGURA 7 - CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE	26
FIGURA 8 - REFERENCIAIS FOTOGRAMÉTRICO E CARTESIANO TRIDIMENSIONAL LOCAL NAS EQUAÇÕES DE COLINEARIDADE	28
FIGURA 9 - INTERSEÇÃO À VANTE	30
FIGURA 10 - CONFIGURAÇÃO IDEAL DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO NO MÉTODO DE CÂMERAS CONVERGENTES	33
FIGURA 11 - RESTITUIDOR DIGITAL.....	37
FIGURA 12 - INTERSEÇÃO DA RETA DA COLINEARIDADE COM O MDS	38
FIGURA 13 - RETIFICAÇÃO DE IMAGENS	40
FIGURA 14 - AMOSTRAGEM POR MALHA REGULAR.....	42
FIGURA 15 - AMOSTRAGEM POR PONTOS ALEATÓRIOS	43
FIGURA 16 - REDE IRREGULAR TRIANGULADA.....	44
FIGURA 17 - FACHADA PRINCIPAL DO SOLAR DO ROSÁRIO.....	48
FIGURA 18 - LOCALIZAÇÃO DA BASE EM RELAÇÃO À FACHADA	49
FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO NA FACHADA	49
FIGURA 20 - INTERSEÇÃO PLANA.....	51

FIGURA 21 - INTERSEÇÃO ESPACIAL.....	53
FIGURA 22 - SISTEMA DE COORDENADAS DO ESPAÇO OBJETO.....	57
FIGURA 23 - ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO DAS FOTOGRAFIAS	58
FIGURA 24 - LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO	59
FIGURA 25 - REFERENCIAL INSTRUMENTAL.....	60
FIGURA 26 - TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL	62
FIGURA 27 - MARCAS DO RESEAU	64
FIGURA 28 - FACHADA RESTITUÍDA ESTEREOSCOPICAMENTE.....	68
FIGURA 29 - COLINEARIDADE ENTRE FOTOGRAFIAS INCLINADAS E RETIFICADAS.....	72
FIGURA 30 - FOTOGRAFIA RETIFICADA	74
FIGURA 31 - DISTORÇÕES APRESENTADAS NA ORTOFOTO DIGITAL.....	76
FIGURA 32 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDOS NA ESTEREORESTITUIÇÃO.....	107
FIGURA 33 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDOS NA MONORESTITUIÇÃO	110
FIGURA 34 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO (FOTOGRAFIA RETIFICADA – 1º PLANO)	115
FIGURA 35 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO (FOTOGRAFIA RETIFICADA – 2º PLANO)	115
FIGURA 36 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO (FOTOGRAFIA RETIFICADA – 3º PLANO)	116
FIGURA 37 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO (FOTOGRAFIA RETIFICADA – 4º PLANO)	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS TOPOGRÁFICOS	50
TABELA 2 -VALORES APROXIMADOS DAS COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E DOS ÂNGULOS EULERIANOS DAS FOTOGRAFIAS.....	58
TABELA 3 -COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO PLANA – ESTAÇÃO TOTAL	79
TABELA 4 -COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO PLANA – TEODOLITO ELETRÔNICO.....	79
TABELA 5 -COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO ESPACIAL – ESTAÇÃO TOTAL	80
TABELA 6 -COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO ESPACIAL – TEODOLITO ELETRÔNICO	80
TABELA 7 -DISCREPÂNCIAS ENTRE COORDENADAS CALCULADAS POR INTERSEÇÃO PLANA E INTERSEÇÃO ESPACIAL – ESTAÇÃO TOTAL.....	81
TABELA 8 -DISCREPÂNCIAS ENTRE COORDENADAS CALCULADAS POR INTERSEÇÃO PLANA E INTERSEÇÃO ESPACIAL – TEODOLITO ELETRÔNICO .	82
TABELA 9 -DISCREPÂNCIAS ENTRE COORDENADAS CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO PLANA PARA OBSERVAÇÕES REALIZADAS A PARTIR DA ESTAÇÃO TOTAL E DO TEODOLITO ELETRÔNICO.....	83

TABELA 10 -DISCREPÂNCIAS ENTRE COORDENADAS CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO ESPACIAL PARA OBSERVAÇÕES REALIZADAS A PARTIR DA ESTAÇÃO TOTAL E DO TEODOLITO ELETRÔNICO.....	84
TABELA 11 -PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DA CÂMERA.....	85
TABELA 12 -COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E ÂNGULOS DE EULER – TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL (MARCAS DO RESEAU)	86
TABELA 13 -DESVIO PADRÃO MÉDIO DOS RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS – TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL.....	87
TABELA 14 -COORDENADAS AJUSTADAS DOS PONTOS DE APOIO E FOTOGAMÉTRICOS NO REFERENCIAL DO ESPAÇO OBJETO – TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL.....	87
TABELA 15 -RESÍDUOS DOS PONTOS DE APOIO – TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL	88
TABELA 16 -COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E ÂNGULOS DE EULER – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (MARCAS DO RESEAU)	88
TABELA 17 -DESVIO PADRÃO MÉDIO DOS RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (MARCAS DO RESEAU)	88
TABELA 18 -COORDENADAS AJUSTADAS DOS PONTOS DE APOIO E FOTOGAMÉTRICOS NO REFERENCIAL DO ESPAÇO OBJETO – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (MARCAS DO RESEAU).....	89
TABELA 19 -RESÍDUOS DOS PONTOS DE CONTROLE – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (MARCAS DO RESEAU).....	89

TABELA 20 -COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E ÂNGULOS DE EULER – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (4 MARCAS PRINCIPAIS)	90
TABELA 21 -DESVIO PADRÃO MÉDIO DOS RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (4 MARCAS PRINCIPAIS).....	90
TABELA 22 -COORDENADAS AJUSTADAS DOS PONTOS DE CONTROLE E FOTOGRAMÉTRICOS NO REFERENCIAL DO ESPAÇO OBJETO – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (4 MARCAS PRINCIPAIS).....	91
TABELA 23 -RESÍDUOS DOS PONTOS DE CONTROLE – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (4 MARCAS PRINCIPAIS).....	91
TABELA 24 -VARIÂNCIA A POSTERIORI E χ^2 OBTIDOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO	92
TABELA 25 -DIFERENÇAS RELATIVAS ENTRE COORDENADAS AJUSTADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E ÂNGULOS DE EULER OBTIDOS POR TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL E AFIM GERAL NO PLANO	94
TABELA 26 -DESVIOS PADRÃO MÉDIOS DOS RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS	95
TABELA 27 -DIFERENÇAS RELATIVAS ENTRE COORDENADAS DO ESPAÇO OBJETO AJUSTADAS UTILIZANDO OBSERVAÇÕES CORRIGIDAS DO TRABALHO DO FILME POR TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL E AFIM GERAL.....	96
TABELA 28 -DIFERENÇAS RELATIVAS ENTRE COORDENADAS AJUSTADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E ÂNGULOS DE EULER OBTIDOS POR TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL E AFIM GERAL NO PLANO	97

TABELA 29 -DESVIOS PADRÃO MÉDIOS DOS RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS	98
TABELA 30 -DIFERENÇAS RELATIVAS ENTRE COORDENADAS DO ESPAÇO OBJETO AJUSTADAS UTILIZANDO OBSERVAÇÕES CORRIGIDAS DO TRABALHO DO FILME UTILIZANDO AS 4 MARCAS DO <i>RESEAU</i> E AS 4 MARCAS PRINCIPAIS	99
TABELA 31 -COORDENADAS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO (LEVANTAMENTO TOPOGÁFICO).....	101
TABELA 32 -COORDENADAS DE PONTOS DA FACHADA OBTIDAS POR ESTEREORESTITUIÇÃO	102
TABELA 33 -COORDENADAS DE PONTOS DA FACHADA OBTIDAS POR MONORESTITUIÇÃO	103
TABELA 34 -COORDENADAS DE PONTOS DA FACHADA OBTIDAS A PARTIR DA FOTOGRAFIA RETIFICADA.....	104
TABELA 35 -DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDAS POR ESTEREORESTITUIÇÃO	105
TABELA 36 -DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDOS POR ESTEREORESTITUIÇÃO	106
TABELA 37 -DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDAS POR MONORESTITUIÇÃO	108
TABELA 38 -DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDOS POR ESTEREORESTITUIÇÃO	109

TABELA 39 -DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDAS POR OBSERVAÇÕES NA FOTOGRAFIA RETIFICADA.....	112
TABELA 40 -DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDOS A PARTIR DA FOTOGRAFIA RETIFICADA.....	113
TABELA 41 - MÉDIAS DOS DESVIOS OBTIDOS NA FOTOGRAFIA RETIFICADA	114

RESUMO

A representação gráfica de monumentos arquitetônicos através de produtos fotogramétricos tem se restringido ao uso de fotografias retificadas e estereorestituição. A retificação de fotografias é utilizada principalmente nos levantamentos que requerem baixa precisão e em superfícies planas (ou de baixo relevo). A estereorestituição contempla as exigências mais gerais dos arquitetos e historiadores da arte, apresentando precisão satisfatória na representação gráfica das feições. O presente trabalho especifica métodos fotogramétricos utilizados no cadastramento de monumentos arquitetônicos, analisando a precisão dos produtos resultantes. Todos os produtos foram produzidos digitalmente, através de imagens obtidas em filme fotográfico e digitalizadas. Foram obtidos quatro produtos distintos, através de estereorestituição, monorestituição, retificação de fotografias e ortoprojeção. Cada um dos produtos apresenta vantagens e desvantagens, sendo indicados de acordo com a precisão requerida no levantamento e características da superfície.

RESUMÉN

La representación gráfica de monumentos arquitectónicos através de productos fotogramétricos se há restringido al uso de fotografías rectificadas y estereorestitución. La retificación de fotografías es utilizada principalmente en los levantamientos que requieren baja precisión y en superficies planas (o con poco relieve). La estereorestitución contempla las exigências mas generales de los arquitectos y historiadores de la arte, presentando precisión satisfactoria en la presentación gráfica de los trazos arquitectónicos. El presente trabajo especifica los métodos fotogramétricos utilizados en el catastro de monumentos arquitectónicos, analizando la precisión de los productos resultantes. Todos los productos fueron producidos digitalmente, através de imagenes obtenidas en película y digitalizadas. Fuerón obtenidos cuatro productos distintos, através de estereorestitución, monorestitución, retificación de fotografías y ortoprojección. Cada uno de los productos presenta ventajas y desventajas, siendo indicados de acuerdo con la precisión requerida en el levantamiento y características de la superficie.

ABSTRACT

The graphic representation of architectural monuments through photogrammetric products has been restricted to the use of stereophotogrammetric restitution and rectificated photographs. The rectification of photos is mainly used in de surveying which requires low precision and smooth surface. The stereophotogrammetric restitution aims to satisfy more general requirements of architecture and art history researcher, because presents satisfactory accuracy in the graphic representation of features. The present work specifies photogrammetric methods used in the architectonic monuments survey, analysing were digitally produced, through images obtained from photographic films digitalized. It were obtained four different products through stereophotogrammetric restitution, mono-differential restitution, photographic rectification and orthoprojection. Each product presents advantages and disadvantages, being indicated according with the required accuracy in the surveying and surface characteristics.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento acelerado da população nas grandes cidades tem provocado alterações desordenadas na estrutura do espaço urbano, gerando intensa especulação imobiliária, podendo representar ameaça ao patrimônio urbano, seja este ambiental ou arquitetônico. No século XIX, a preservação de exemplares arquitetônicos, que simbolizam a cultura e a história de um determinado grupo social, começa a ser discutida e surgem os pioneiros do estudo do patrimônio arquitetônico.

Percebe-se então a necessidade de preservar o patrimônio arquitetônico da humanidade. Para preservar é necessário documentar os exemplares arquitetônicos considerados importantes a um determinado grupo social, considerados então como monumentos históricos. Entende-se como monumento histórico não somente às grandes criações, mas também as obras modestas que adquirem com o tempo valor cultural significativo (Carta de Veneza, 1964).

A documentação tem por objetivo recolher, buscar e agrupar todas as informações possíveis para o conhecimento profundo e exaustivo do monumento, subsidiando trabalhos de intervenção arquitetônica, sejam estes de conservação ou de restauração. Esta documentação deve envolver desenhos ou modelos numéricos que permitam a sua representação.

A representação gráfica de um monumento arquitetônico consiste de um trabalho minucioso, realizado a partir de medições, que podem ser efetuadas por métodos diretos e indiretos. Os métodos de medição direta são morosos e

exaustivos, porém são os mais utilizados em levantamentos desta natureza. Desde meados do século XIX experiências de levantamentos fotogramétricos (medição indireta) aplicados à Arquitetura, estão sendo realizadas, mostrando que a Fotogrametria pode ser uma boa opção para documentar um monumento.

O Levantamento por Fotogrametria é considerado um método rápido e eficaz para obtenção de informações precisas a respeito de um objeto, uma vez que a própria fotografia já é um documento. Existem diferentes métodos fotogramétricos que podem ser aplicados em levantamentos arquitetônicos. A escolha do método fotogramétrico deve levar em consideração a finalidade a que se destina o levantamento, assim como a precisão requerida.

A utilização da Fotogrametria é muitas vezes considerada impraticável, devido ao instrumental necessário e à mão de obra altamente especializada. No entanto estes fatores estão sendo gradativamente minimizados com o avanço da computação gráfica, processamento de dados e em consequência da Fotogrametria Digital. Os equipamentos fotogramétricos estão sendo substituídos por programas computacionais, que proporcionam soluções nas formas vetorial e raster.

A facilidade operacional de alguns métodos fotogramétricos tem permitido que o próprio usuário elabore a documentação gráfica de um monumento. Para que isto seja possível é necessário o conhecimento de cada uma das etapas necessárias para o desenvolvimento do produto fotogramétrico, desde a tomada das fotografias e levantamento dos pontos de apoio até a elaboração do produto final.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Especificar os métodos fotogramétricos utilizados no cadastramento de monumentos arquitetônicos, para fins de conservação e restauração, assim como analisar a precisão dos produtos resultantes.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Detalhar as etapas necessárias para a obtenção da documentação geométrica de monumentos arquitetônicos através de:
 - a) estereorestituição digital;
 - b) monorestituição digital;
 - c) retificação de fotografias;
 - d) ortofoto digital.
- comparar a precisão alcançada em cada um dos métodos detalhados no objetivo geral;
- verificar as vantagens e desvantagens do uso de cada um dos métodos;
- estabelecer critérios para a escolha do método fotogramétrico, de acordo com a necessidade do levantamento e características da construção;

1.3 ESTRUTURA E CONTEÚDO

O trabalho está direcionado a profissionais que trabalham com preservação e restauração de monumentos arquitetônicos, apresentando no capítulo 2 alguns conceitos relacionados ao cadastramento de monumentos históricos, tais como preservação de monumentos, levantamento gráfico das feições através de técnicas tradicionais e Fotogrametria Arquitetônica.

No capítulo 3 são apresentados conceitos básicos de Fotogrametria para levantamentos arquitetônicos, de modo a fornecer subsídios à compreensão do desenvolvimento do trabalho. Na sequência (capítulo 4) descreve-se a metodologia aplicada assim como os materiais, instrumentais e recursos computacionais utilizados. No capítulo 5 são mostrados os resultados e realizadas as análises e finalmente no capítulo 6, são delineadas as conclusões e recomendações relacionadas ao levantamento fotogramétrico.

Ao final do trabalho é apresentado um glossário de alguns termos técnicos de Fotogrametria apontados no decorrer do texto, com o objetivo de facilitar a leitura, permitindo uma melhor compreensão do conteúdo.

2 CADASTRAMENTO DE MONUMENTOS HISTÓRICOS

2.1 PRESERVAÇÃO DE MONUMENTOS HISTÓRICOS

A noção de monumentos históricos compreende uma criação arquitetônica isolada como também um sítio urbano ou rural, que dão testemunho de uma civilização particular, de uma evolução significativa ou de um acontecimento histórico (Carta de Veneza, 1964). Os monumentos históricos, com seu peso simbólico, estão vinculados à vida das cidades, exercendo uma certa pressão que é refletida na identidade social e cultural da cidade onde estão instalados, sendo adensada ao longo da história (CAMPELLO, 1998).

Com vistas à preservação da cultura de grupos sociais, a humanidade se preocupa, entre outros fatores, em proteger seus monumentos. A preservação, nas palavras de NEVES & VIEIRA (2000), consiste da esperança de ainda poder resgatar espaços e bens de valor cultural, significativos para a identidade de um grupo social. Preservar não é parar o tempo, é intervir com sensibilidade nas forças de mudanças, é entender o presente como um produto do passado e um modificador do futuro.

A preservação tem por finalidade resguardar o dano, a decadência ou a deterioração, sendo o mesmo que conservação. A preservação exige antes de tudo um monitoramento permanente que pode ser favorecido pela destinação de monumentos a funções úteis à sociedade. De acordo com LINARTH (1999), toda obra preservada deve ter uma utilidade prática, sendo esta a melhor maneira de conservar o patrimônio histórico, pois através de seu uso produz-se um efeito

educativo perante as pessoas que a visitam, incentivando sua conservação para as gerações futuras.

Conforme o estado de conservação do monumento, o processo de intervenção necessita ser mais complexo, exigindo uma restauração, que consiste do trabalho de recuperação feito em uma construção ou obra de arte parcialmente destruídas, com o objetivo de recuperar a melhor fase da obra. A restauração deve ter caráter excepcional (Carta de Veneza, 1964), conservando e revelando os valores estéticos e históricos do monumento. A restauração baseia-se no respeito ao material original, em evidências arqueológicas, no plano inicial, na pesquisa e documentação histórica, assim como no levantamento gráfico.

2.1.1 Levantamento Gráfico de Monumentos Históricos

Para a preservação ou restauração do patrimônio edificado, é imprescindível a execução de um levantamento gráfico, que constitui um inventário ou uma base documental. O levantamento gráfico de um monumento, também denominado de levantamento cadastral, tem por objetivo subsidiar a elaboração de propostas de intervenção arquitetônica capazes de interromper e reverter o processo de degradação física do edifício, garantindo sua correta adequação às funções culturais e de lazer (ALMEIDA & SANTANA, 2000).

O levantamento gráfico consiste de uma descrição gráfica minuciosa do edifício, obtido a partir da tomada de medidas de largura, comprimento e altura dos ambientes assim como do registro dos detalhes construtivos, com o objetivo de torná-lo um instrumento de documentação a ser utilizado nas análises e investigações. Este levantamento pode estabelecer vínculos que vão desde os estudos históricos até aqueles puramente tecnológicos, ratificando, portanto, as

funções de registro, identificação e proposição que este instrumento assume (ALMEIDA & SANTANA, 2000).

O registro gráfico proporciona a leitura do espaço e de sua arquitetura assim como de suas tipologias, morfologia e estado de conservação, além de ganhar importância no processo de avaliação da integração da nova arquitetura projetada com seu entorno, como um ato de tecer o novo e o antigo juntos (SAMPAIO, 2000).

2.1.2 Levantamento Gráfico Tradicional

O levantamento gráfico de monumentos arquitetônicos é efetuado, tradicionalmente, com técnicas simples como o levantamento a trena, *in loco*, onde todos os elementos necessários para sua representação são cuidadosamente medidos. Esta técnica tradicional, utilizada na maioria dos trabalhos realizados no Brasil, baseia-se em medições diretas sobre o monumento, o que além de torná-lo mais moroso, dependendo do estado de conservação, pode ainda danificá-lo. O desenho é normalmente efetuado pela mesma pessoa que efetua o croqui do levantamento, não sendo raro o retorno ao campo para complementar ou averiguar medidas imprescindíveis a fim de concluir a representação.

Algumas dificuldades são encontradas no levantamento a trena: representação dos elementos curvos, que requerem sua medição em vários pontos ao longo da superfície; tamanho do monumento, pois quanto maior sua extensão, mais demorado se torna o levantamento, chegando a inviabilizar a utilização de trenas; representação dos ângulos entre as arestas, que nem sempre são retos.

A Topografia é também utilizada para auxiliar a medição de algumas feições, através do uso de equipamentos que permitem medições indiretas tais como teodolitos ou estações totais, cuja representação se efetua através de coordenadas calculadas analiticamente.

2.2 FOTOGRAMETRIA ARQUITETÔNICA

Fotogrametria é a ciência e tecnologia usada para a obtenção de informações confiáveis através de processos de registro, interpretação e mensuração de imagens. Desde sua concepção, a Fotogrametria é principalmente aplicada na elaboração de mapas em colaboração de outras ciências como a Geodésia e a Cartografia. (ANDRADE, 1998)

Para outras aplicações, além do mapeamento topográfico, tem sido utilizado os termos Fotogrametria não Topográfica, Fotogrametria a Curta Distância ou Fotogrametria Especial. As principais áreas de aplicação não topográfica da Fotogrametria são a Arquitetura, a Medicina e a Engenharia Industrial. (KARARA, 1989)

A idéia de utilizar as propriedades geométricas de fotografias em levantamentos arquitetônicos surgiu por volta de 1840. As primeiras experiências baseadas na perspectiva fotográfica começaram a aparecer dez anos mais tarde, sendo o primeiro levantamento desenvolvido por Albrecht Meydenbauer no ano de 1867, quando foi introduzido o termo “Fotogrametria Arquitetônica”. (CARBONELL, 1989)

O uso da Fotogrametria em levantamentos arquitetônicos ficou estagnado durante muitos anos. Somente após a 2ª. Guerra Mundial, com a finalidade de registro de monumentos históricos, como subsídio a trabalhos de

conservação e restauração, é que a Fotogrametria Arquitetônica começou a ser motivada. Hoje, muitos levantamentos arquitetônicos baseiam-se em técnicas fotogramétricas.

O levantamento fotogramétrico arquitetônico pode ser classificado, de acordo com JAUREGUI & JAUREGUI (2000), em levantamento geral e levantamento detalhado. O levantamento geral é utilizado para representar a forma da construção de maneira geral, mostrando suas principais linhas arquitetônicas. Este tipo de levantamento é utilizado para trabalhos preliminares de restauração, bem como em inventários.

Levantamentos detalhados são completos e rigorosos, usados na documentação sistemática de construções a serem restauradas. Seu objetivo é produzir todas as informações necessárias para preparar o projeto de restauro. Estes levantamentos requerem alta precisão.

Para o ICOMOS (Conselho Internacional de Monumentos e Sítios), os levantamentos para representações de monumentos e sítios históricos são divididos em três grupos, de acordo com suas necessidades e exigências. O primeiro grupo, denominado de levantamentos rápidos e relativamente simples engloba os estudos preliminares, inventário e estudo da história da arte. O erro máximo permitido no posicionamento dos pontos é de 5 cm, sendo a representação gráfica efetuada na escala 1:100 ou 1:200. A representação envolve linhas arquitetônicas principais, em elevações e seções verticais.

O segundo grupo, denominado de levantamentos precisos, atende as exigências mais gerais dos arquitetos e historiadores da arte. Este grupo

engloba os levantamentos de conservação do patrimônio, administrado por organizações oficiais. A variedade de aplicações dos levantamentos precisos é grande: análise de monumentos, conservação e restauração, levantamento de monumentos históricos, desenvolvimento de fachadas, decoração de monumentos e levantamentos arqueológicos.

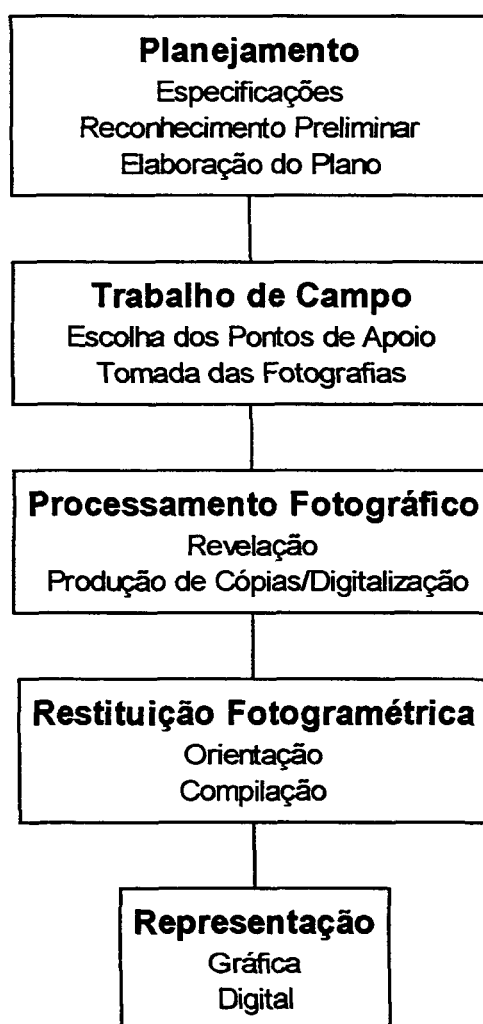
A escala da representação gráfica dos levantamentos precisos é normalmente 1:50, sendo de 1 a 2 cm o erro máximo permitido no posicionamento dos pontos. Para edifícios grandes a escala preferida é 1:100, porém com detalhes em 1:20 ou 1:10. O levantamento envolve elevações de fachadas exteriores e de paredes interiores, seções verticais, plantas, desenho de abóbadas ou tetos. Para expressar a forma de superfícies curvas, abóbadas ou cúpulas são utilizadas curvas de nível. A escolha e a determinação dos planos de referência é muito importante para o levantamento.

O terceiro grupo de levantamentos corresponde ao de alta precisão. O erro máximo admissível nos levantamentos deste grupo é de 1 mm, chegando em alguns casos a 0,1 mm. A aplicação destes levantamentos está na representação de elementos esculpidos (estátuas ou decoração) ou ainda em objetos arqueológicos ou de arte. Um dos objetivos deste tipo de levantamento é o monitoramento periódico, devido a “doença da pedra”, que degrada progressivamente o monumento.

Independente do grupo e da precisão requerida, o levantamento fotogramétrico é um procedimento complexo que requer um bom

planejamento das atividades envolvidas para se obter resultados satisfatórios. O esquema mostrado na figura 1 mostra as etapas a serem cumpridas e planejadas em um levantamento fotogramétrico.

FIGURA 1 - ESQUEMA DAS ATIVIDADES DE UM LEVANTAMENTO FOTOGRAFAMÉTRICO



Fonte: Adaptado de JAUREGUI & JAUREGUI (2000)

2.3 PATRIMÔNIO HISTÓRICO BRASILEIRO

O assunto patrimônio histórico começou a ser discutido no Brasil em 1920, quando foi elaborado um anteprojeto de lei de defesa do patrimônio artístico, em especial dos bens arqueológicos, sendo que em 1923 a Câmara dos Deputados propôs a criação de uma Inspetoria de Monumentos Históricos.

No ano de 1934 organizou-se o Serviço de Proteção aos Monumentos e às Obras de Arte Tradicionais junto com a nova Constituição Brasileira, que em seu artigo 148 dispõe: “Cabe à União, aos Estados e aos Municípios ... proteger os objetos de interesse histórico e o patrimônio artístico do país.”

Em 1937 é criado o Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – SPHAN, sendo em 1946 transformado em Diretoria (DPHAN), com quatro distritos, com sedes em Recife, Salvador, Belo Horizonte e São Paulo. Em 1970 a Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – DPHAN foi transformada em Instituto, sendo então denominado de Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN.

Durante 1976, o IPHAN foi reestruturado e descentralizado em nove Diretorias Regionais e sete grupos de museus e casas históricas. Em 1979 foi criada a Secretaria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – SPHAN como também a Fundação Nacional Pró-Memória, entidade incumbida de executar a política da SPHAN. Em 1981 criou-se a Secretaria da Cultura do MEC, sendo que a SPHAN tornou-se uma Subsecretaria subordinada ao novo órgão. Em 1986, com a criação do Ministério da Cultura, restabeleceu-se a Secretaria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional.

2.3.1 Fotogrametria Arquitetônica no Brasil

Em 1981, foi realizado o levantamento cadastral das Remanescentes da Igreja de São Miguel Arcanjo - RS. Tal levantamento teve como objetivo representar e analisar graficamente as características físicas do monumento, os processos de degradação assim como documentar as diversas intervenções que o mesmo sofreu ao longo de sua história. A maior parte deste levantamento foi efetuado por métodos topográficos. A Fotogrametria restringiu-se ao levantamento da frontaria (fachada principal) e da torre. A representação gráfica identificou além dos elementos componentes das superfícies dos maciços, suas fraturas, lacunas e desníveis (LEAL, 1984).

Em 1990, o levantamento fotogramétrico do Cristo Redentor – RJ, foi apresentado durante o XIII Simpósio Internacional do CIPA (Comitê Internacional de Fotogrametria Arquitetônica), na cidade de Cracóvia - Polônia. O produto resultante constituiu de uma estereorestituição, na escala gráfica 1:50, obtida em equipamento fotogramétrico analógico. A representação das formas do monumento se deu através de curvas de nível (GOMES et al., 1990).

A fachada principal da Igreja Nossa Senhora da Boa Hora, localizada na cidade de Olinda – PE, foi documentada através de restituição fotogramétrica, mostrando o estado de desgaste da alvenaria com a representação das fissuras existentes. O trabalho completo englobou levantamento topográfico de precisão na determinação dos pontos de controle, a cobertura fotográfica foi realizada através de câmera métrica e a representação das feições foi obtida por estereorestituição analítica (MEDINA et al., 1991).

Em 1992, durante o I SEFLA - Seminário de Fotogrametria Terrestre Aplicada a Levantamentos Arquitetônicos e Arqueológicos, foi proposta a criação de um Arquivo Fotogramétrico do Patrimônio Histórico e Cultural Brasileiro cuja regulamentação técnica foi aprovada durante o XVI Congresso Brasileiro de Cartografia, em 1993.

Em 1994, a Sociedade Brasileira de Cartografia constituiu um grupo de trabalho com a finalidade de desenvolver um anteprojeto para o Cadastro Fotogramétrico de Monumentos Históricos do Brasil cuja metodologia foi apresentada em 1995, durante o XVII Congresso Brasileiro de Cartografia, ocasião em que foi realizado o II SEFLA- Seminário de Fotogrametria Terrestre Aplicada a Levantamentos Arquitetônicos e Arqueológicos.

Na Bahia, o Castelo da Torre de Garcia D'Ávila foi objeto de estudo onde a Fotogrametria foi aplicada. O controle terrestre foi obtido por Topografia e o monumento foi restituído num equipamento fotogramétrico analítico, sendo o produto final representado na escala 1:50 (GOMES et al., 1996).

Outros trabalhos de cadastramento de monumentos históricos (Igreja São João Batista – SC, Capela de Santa Bárbara – RJ e Portal do Forte São Luiz – RJ) estão sendo realizados, como pode ser observado em MARTINS et al. (1998) e GOMES et al. (1999). O *software PhotoModeler* da empresa Eos Systems Inc., foi utilizado em ambos trabalhos através de imagens digitais. O *software* foi desenvolvido para Fotogrametria Terrestre e requer a utilização de um mínimo de três fotografias de cada fachada levantada, utilizando duas fotografias laterais convergentes e uma central, normal à fachada, na qual são realizadas as medições e gerada a representação gráfica.

A pesquisa bibliográfica referente a Fotogrametria Arquitetônica Brasileira mostra que, com exceção do levantamento das Remanescentes da Igreja de São Miguel Arcanjo, coordenada por arquitetos, os grupos de trabalho estão vinculados a instituições de ensino (Instituto Militar de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco e Universidade Federal de Santa Catarina). Estes grupos de trabalho são formados, principalmente, por profissionais ligados à Fotogrametria, sendo raro o acompanhamento de profissionais ligados à restauração arquitetônica.

As técnicas fotogramétricas aplicadas à cadastramento de monumentos históricos necessitam de maior difusão perante os profissionais que trabalham efetivamente com obras ligadas ao patrimônio histórico, que em sua maioria correspondem a arquitetos ou historiadores. Muitos trabalhos de intervenção arquitetônica são realizados em todo o Brasil, conforme pode ser observado em bibliografia especializada (Revista do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, Revista do ICOMOS-BRASIL, Construção – Região Sul, Projeto, entre outras). O intercâmbio entre as duas áreas: Fotogrametria e Arquitetura é que pode proporcionar um maior desenvolvimento da Fotogrametria Arquitetônica e seu uso eficaz no levantamento gráfico dos monumentos.

2.4 ESTADO DA ARTE DA FOTOGRAMETRIA ARQUITETÔNICA

Desde a concepção da Fotogrametria Arquitetônica pelo alemão Albrecht Meydenbauer em 1867, muitos monumentos e sítios históricos foram documentados através de técnicas fotogramétricas. A cobertura fotográfica, essencial ao levantamento, tem sido obtida por diferentes câmeras: métricas, semi-métricas e não métricas. O uso de câmeras digitais e de vídeo também estão sendo testadas em Fotogrametria Terrestre. Quanto ao produto fotogramétrico, este tem sido obtido

por restituição fotogramétrica ou por retificação de fotografias, com soluções vetoriais e raster.

Várias universidades e institutos de pesquisa em todo o Mundo têm buscado atender as recomendações internacionais quanto à documentação de monumentos e sítios históricos, desenvolvendo técnicas fotogramétricas voltadas à Arquitetura e Arqueologia.

Uma campanha internacional, iniciada em 1990, motivada pelo Comitê Internacional de Fotogrametria Arquitetônica – CIPA, testou o uso de diferentes câmeras e métodos de mensuração fotogramétrica, em levantamentos distintos, executados na Estação de Metrô *Otto Wagner's*, localizada em Viena – Áustria. A campanha envolveu dezesseis Institutos de Fotogrametria, distribuídos em dez países europeus e foram apresentadas 107 (cento e sete) diferentes soluções (ALMAGRO et al., 1996).

As quatro elevações exteriores da Estação foram utilizadas na pesquisa, nas quais foram determinados pontos de controle “naturais” e pontos de controle pré-sinalizados. Com os resultados verificou-se que as câmeras semi-métricas, de formato médio apresentaram melhores resultados, porém as não métricas, de pequeno formato podem ser utilizadas com finalidade arquitetônica emergencial. A comparação entre câmeras semi-métricas de pequeno formato e as não métricas de médio formato demonstraram desempenho semelhante. Quanto à calibração das câmeras, a acurácia alcançada, em todas as soluções (tanto com pré-calibração quanto por auto-calibração), foi melhor que 1 cm e na maioria dos casos a auto-calibração apresentou melhores resultados.

Com o avanço tecnológico na área de computação gráfica e digital, os levantamentos arquitetônicos têm sido executados com maior rapidez, utilizando estações de trabalho digitais através do uso de múltiplas imagens ou imagens singulares, com soluções do tipo vetorial e do tipo raster.

O produto fotogramétrico mais utilizado em levantamentos arquitetônicos corresponde à estereorestituição, porém as características e propriedades das ortofotos têm despertado interesse junto aos usuários, pois elas consistem de uma representação ortogonal acompanhada da textura e cor dos materiais que compõem o objeto fotografado.

A produção de ortofotos requer o conhecimento do modelo tridimensional da superfície imageada, que em Fotogrametria Digital corresponde ao Modelo Digital de Terreno – MDT, sendo em Fotogrametria Terrestre denominado de Modelo Digital de Superfície – MDS. A geração deste MDS ainda não está totalmente resolvida, apresentando problemas nas discontinuidades da superfície. Aplicações bem sucedidas quanto a utilização de ortofotos em arquitetura podem ser encontradas na representação de pinturas em cúpulas e abóbadas, onde a forma da superfície pode ser modelada matematicamente.

Exemplos do uso de ortofotos para representação de elevações arquitetônicas foram testados na Igreja Nicolau, localizada no Sul de Berlim – Alemanha (WIEDEMANN, 1996) e para o *Zabbar Gate*, localizado na Ilha de Malta (BARATIN, 2000). Ambos trabalhos mostram que ainda não há uma solução completa na produção de ortofotos para uso arquitetônico. Problemas como descontinuidade na superfície e partes do objeto não imageadas ainda não foram

resolvidos. A geração de um MDS que represente o objeto fotografado com fidelidade tem inviabilizado o uso de ortofotos.

Pesquisas recentes mostram novas tecnologias para a determinação tridimensional de superfícies arquitetônicas, como o uso de sistemas *laser-scanning*. Estes sistemas podem representar a solução para alguns problemas encontrados em fotogrametria arquitetônica.

O sistema *laser-scanning* é uma nova tecnologia baseada em sistemas de visão tridimensional (visão 3D) que consiste em reproduzir a profundidade de superfícies através de códigos (AL-HANBALI et al., 2000). Os equipamentos emitem um feixe *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance*) que são refletidos ao atingirem a superfície do objeto, retornando ao equipamento, que os absorve através de um conjunto de espelhos. O intervalo de tempo decorrido entre a emissão e a captação dos raios do feixe é então medido e através deste intervalo é possível obter a distância entre o sensor e o objeto.

Laser-scanners têm sido utilizados com sucesso em plataformas aéreas e de satélite, obtendo o MDS da superfície terrestre com alta precisão. A determinação do MDS de superfícies arquitetônicas através de *laser-scanners* é particularmente dificultada devido a instabilidade do espelho de rotação do equipamento e da baixa acurácia na determinação dos parâmetros da projeção central sem GPS – Sistemas de Posicionamento Global (BOCCARDO & COMOGLIO, 2000).

Ortofotos da estação de metrô *Otto Wagner's* produzidas com MDS's derivados de informações 3D obtidas a partir de equipamentos *laser-scanners* foram superpostas a estereorestituição do monumento. Os

resultados quanto a precisão da ortofoto não foram melhores que 3 cm, com discrepâncias maiores nas descontinuidades da superfície (BOCCARDO & COMOGLIO, 2000).

2.5 A FOTOGRAFIA COMO FONTE DE DADOS PARA LEVANTAMENTOS ARQUITETÔNICOS

Antes do advento da fotografia, a representação de objetos, monumentos arquitetônicos e até mesmo da superfície terrestre já era baseada nas propriedades das projeções cônicas, também conhecida por perspectiva central, através de registros obtidos por desenhos à mão livre. A fotografia é uma perspectiva central que registra “objetos” instantaneamente, sendo uma valiosa fonte de informações a respeito deles. A fotografia representa geometricamente um objeto, tendo ainda informações adicionais sobre sua cor e textura, podendo identificar os materiais que a compõem, como também seu estado de conservação.

O uso da fotografia na Arquitetura vem desde o seu surgimento, no início do século XIX. A Arquitetura é intensamente enfocada no período pioneiro da fotografia devido ao fato da Arquitetura ser uma das faces pelas quais se podia registrar o mundo em sua diversidade cultural, sendo hoje conhecida, divulgada e interpretada através de imagens fotográficas (CARVALHO & WOLF, 1998).

As preocupações e interesses da Arquitetura em relação ao passado propiciaram a abertura de um fértil campo de trabalho a ser explorado por fotógrafos. Os registros de arquitetura, feitos tradicionalmente através da representação em desenho, passaram assim a contar com os recursos da fotografia, quando se tratava de representar o existente. As potencialidades da fotografia como um registro fiel possibilitou também a revelação de detalhes

das estruturas fornecendo documentos de estados sucessivos de obras em andamento.

A difusão da fotografia, com a produção comercial em grande escala de equipamentos (câmeras) baratos, permite que pessoas comuns registrem, através de imagens, cenas do cotidiano, incluindo monumentos arquitetônicos de grande valor histórico como também simples edificações. Esses registros amadores são, às vezes, a única fonte de informações a respeito da edificação e podem servir como base de seu cadastramento.

3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE FOTOGRAMETRIA PARA LEVANTAMENTOS ARQUITETÔNICOS

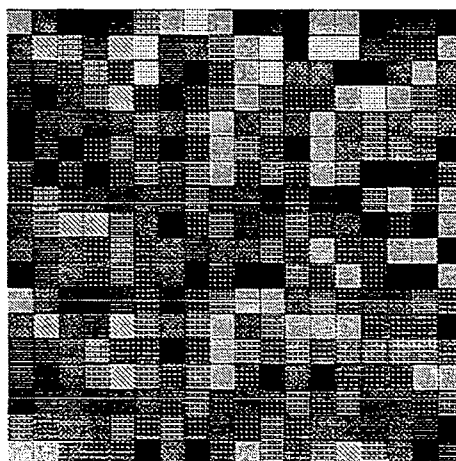
3.1 IMAGEM FOTOGRÁFICA

A fotografia consiste do registro de uma imagem, sendo a base de qualquer trabalho fotogramétrico. Esta imagem pode ser obtida em meios analógicos ou digitais. As fotografias analógicas são registradas em filmes fotográficos denominados de negativos e podem ser reproduzidas para sua forma positiva em base transparente, denominada de diapositivo fotográfico.

Uma fotografia digital (ou imagem digital) pode ser obtida através do emprego de câmeras digitais ou da transformação de fotografias analógicas para digitais pelo processo denominado de digitalização matricial ou *scanning* (MITISHITA, 1997). As câmeras digitais são dotadas de elementos CCD (*charged coupled device*) assim como os equipamentos *scanners* utilizados para transformar as imagens analógicas em digitais.

Uma imagem digital é estruturada na forma *raster* e definida como uma função radiométrica bidimensional e discreta. A estrutura *raster* consiste de uma matriz de células, sendo cada célula definida por sua posição na matriz (linha e coluna) e por um valor numérico inteiro, definido pelo nível de cinza que quantifica a radiação incidente em determinada zona do objeto. A figura 2 esquematiza a estrutura de uma imagem digital.

FIGURA 2 - ESTRUTURA RASTER



3.2 SISTEMAS DE COORDENADAS

Em Fotogrametria são utilizados diferentes referenciais que estão relacionados aos espaços imagem e objeto, os quais devem ser criteriosamente escolhidos de modo a simplificar a obtenção dos dados, os cálculos e a exatidão dos resultados. O estabelecimento de um determinado referencial exige a sua definição e sua materialização (ANDRADE, 1998).

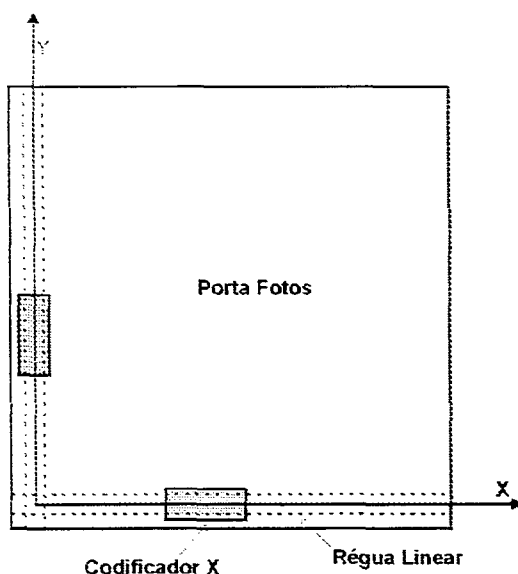
Os referenciais do espaço imagem estão relacionados com a fotografia ou com o local da estação de exposição. Os referenciais denominados de instrumental, fiducial e fotogramétrico são exemplos de referenciais do espaço imagem, sendo os dois primeiros bidimensionais e o terceiro tridimensional (MITISHITA, 1997).

Os referenciais do espaço objeto, em Fotogrametria Convencional, correspondem à superfície física da Terra. Em Fotogrametria Arquitetônica o espaço objeto normalmente utilizado é um sistema de coordenadas cartesiano tridimensional local.

3.2.1 Referencial Instrumental

O referencial instrumental está relacionado ao equipamento utilizado para realizar as observações fotogramétricas. O monocomparador é um exemplo de equipamento fotogramétrico empregado nas observações. Ele baseia-se em codificadores lineares, montados em réguas guias que materializam o referencial (MITISHITA, 1997). O referencial instrumental consiste de um sistema cartesiano bidimensional, conforme pode ser observado na figura 3.

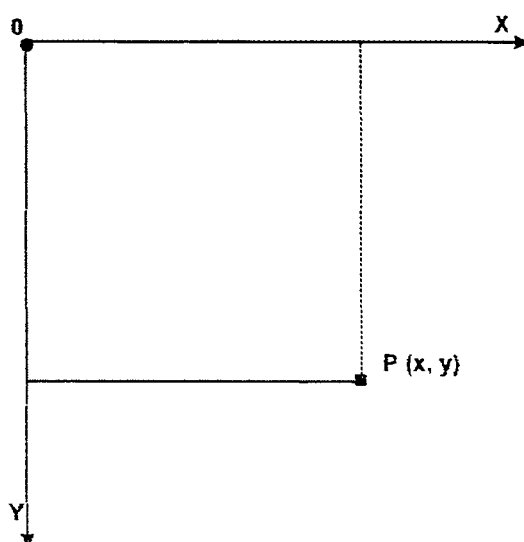
FIGURA 3 - REFERENCIAL INSTRUMENTAL NUM MONOCOMPARADOR



Fonte: MITISHITA, 1997

Em Fotogrametria Digital, o monocomparador é substituído por programas específicos que permitem a leitura das coordenadas dos pontos desejados. Alguns programas disponíveis no mercado possuem sistema de coordenadas semelhante ao dos monocomparadores e outros realizam uma reflexão do eixo Y, conforme apresentado na figura 4.

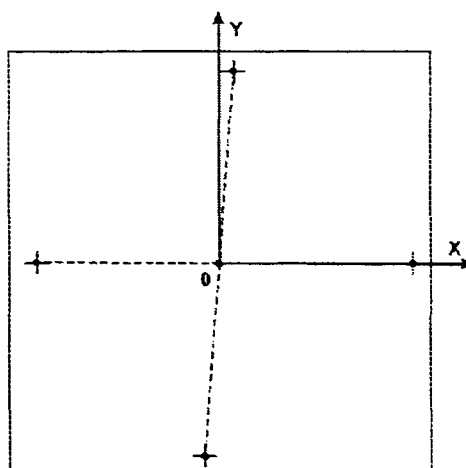
FIGURA 4 - SISTEMA DE COORDENADAS DO REFERENCIAL INSTRUMENTAL
COM REFLEXÃO EM Y



3.2.2 Referencial Fiducial

A materialização do referencial fiducial de uma fotografia é realizada através de pontos gravados nestas, denominados de marcas fiduciais. O sistema de coordenadas fiduciais é um sistema cartesiano bidimensional usualmente definido como o esquematizado na figura 5.

FIGURA 5 - SISTEMA DE COORDENADAS FIDUCIAIS

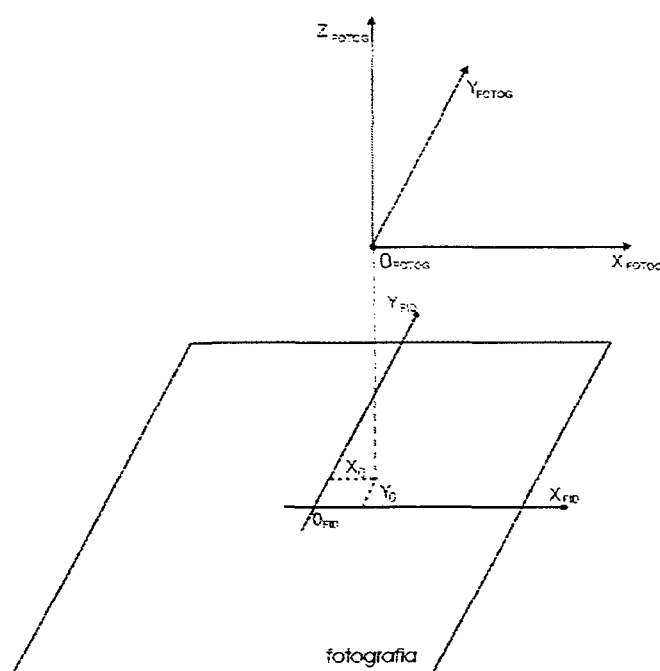


A origem do sistema, denominada de centro fiducial, é obtida pela interseção das retas definidas pelas marcas fiduciais opostas. O eixo OX é coincidente com a linha que une as marcas fiduciais opostas que mais se aproximam do eixo horizontal da câmera e o eixo OY é perpendicular ao eixo OX, formando um sistema dextrógiro (MITISHITA, 1997).

3.2.3 Referencial Fotogramétrico

O referencial fotogramétrico é um sistema cartesiano tridimensional dextrógiro. A origem do sistema é o centro de projeção (O), os eixos OX e OY são paralelos aos seus homônimos do sistema fiducial sendo orientados da mesma maneira e o eixo OZ é perpendicular ao plano formado por OX e OY (WONG, 1980), como poder ser observado na figura 6.

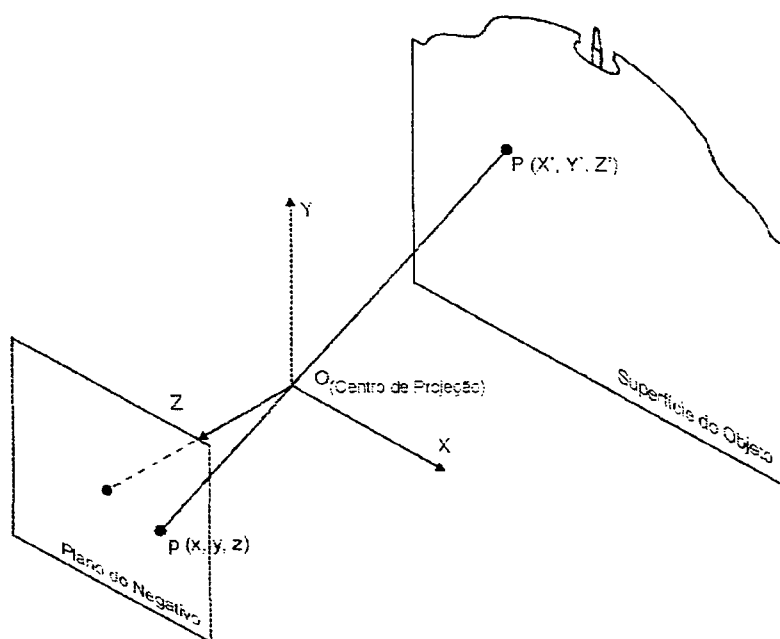
FIGURA 6 - SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO



3.3 EQUAÇÕES DE COLINEARIDADE

A relação entre pontos do espaço objeto e pontos do espaço imagem constitui o modelo matemático fundamental da Fotogrametria, conhecido por equações de colinearidade, que são baseadas na condição teórica de que um ponto do espaço imagem $p(x, y, z)$, seu homólogo do espaço objeto $P(X', Y', Z')$ e o centro de projeção da fotografia estão alinhados, conforme observado na figura 7.

FIGURA 7 - CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE



Da figura 7 obtemos a correspondência entre os pontos dos espaços imagem e objeto, ambos no referencial fotogramétrico:

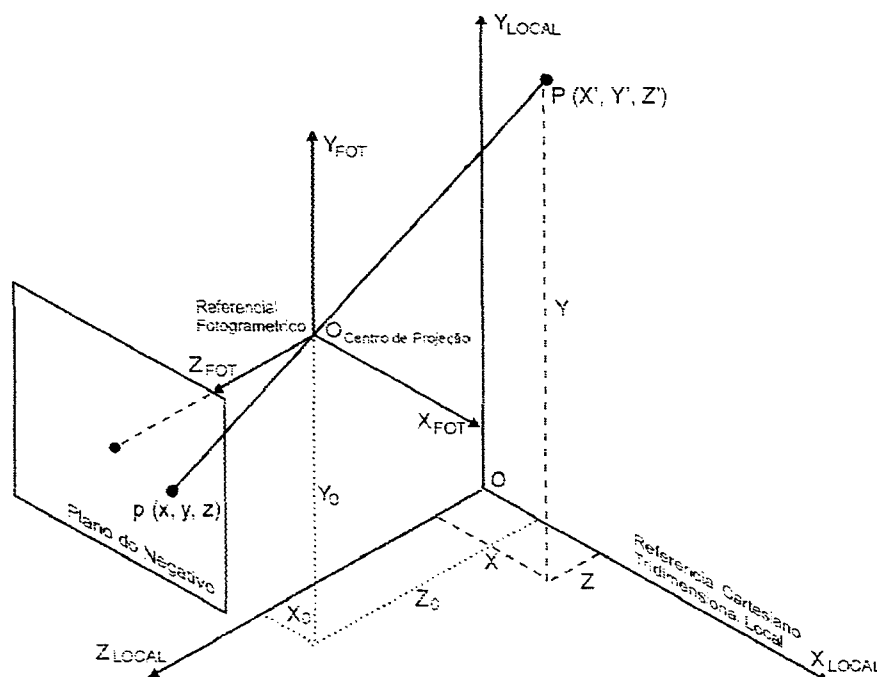
$$\frac{x}{X'} = \frac{y}{Y'} = \frac{z}{Z'} \quad (01)$$

A equação (01) pode ser desmembrada em duas equações linearmente independentes e a coordenada z considerada constante para todos os pontos da imagem, sendo igual à distância focal (c) da câmera:

$$\begin{aligned} x &= c \frac{X'}{Z'} \\ y &= c \frac{Y'}{Z'} \end{aligned} \tag{02}$$

Considerando o referencial do objeto como um sistema de coordenadas cartesiano tridimensional local, as coordenadas do ponto $P (X, Y, Z)$ neste sistema são obtidas através de uma transformação isogonal no espaço que envolve sete parâmetros: um de escala (λ), três de translação (X_0, Y_0, Z_0) e três de rotação (χ, φ, ω), conhecidos por ângulos de Euler, necessários para deixar os dois referenciais paralelos entre si (χ, φ e ω correspondem aos eixos Z, Y e X , respectivamente). A figura 8 mostra os referenciais fotogramétrico e o cartesiano tridimensional local, envolvidos nas equações de colinearidade.

FIGURA 8 - REFERENCIAIS FOTOGRAMÉTRICO E CARTESIANO TRIDIMENSIONAL LOCAL NAS EQUAÇÕES DE COLINEARIDADE



sendo:

(X', Y', Z') = coordenadas do ponto P do espaço objeto no referencial fotogramétrico;

(X, Y, Z) = coordenadas do ponto P do espaço objeto no referencial local;

(X_0, Y_0, Z_0) = coordenadas do centro de projeção no referencial local;

A transformação isogonal que relaciona as coordenadas de um ponto P do espaço objeto, nos referenciais fotogramétrico e cartesiano tridimensional local é dada por:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \lambda \cdot M \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (03)$$

Sendo:

λ = fator de escala;

M = matriz de rotação, resultante do produto das matrizes de rotação $R_Z(\chi)$,

$R_Y(\varphi)$ e $R_X(\omega)$:

$$M = R_Z(\chi) \cdot R_Y(\varphi) \cdot R_X(\omega) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (04)$$

$$R_X(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$$

$$R_Y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (05)$$

$$R_Z(\chi) = \begin{bmatrix} \cos \chi & \sin \chi & 0 \\ -\sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Substituindo (03) e (04) em (02) temos as equações conhecidas por equações de colinearidade, que relacionam coordenadas do espaço imagem com coordenadas do espaço objeto:

$$x = c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

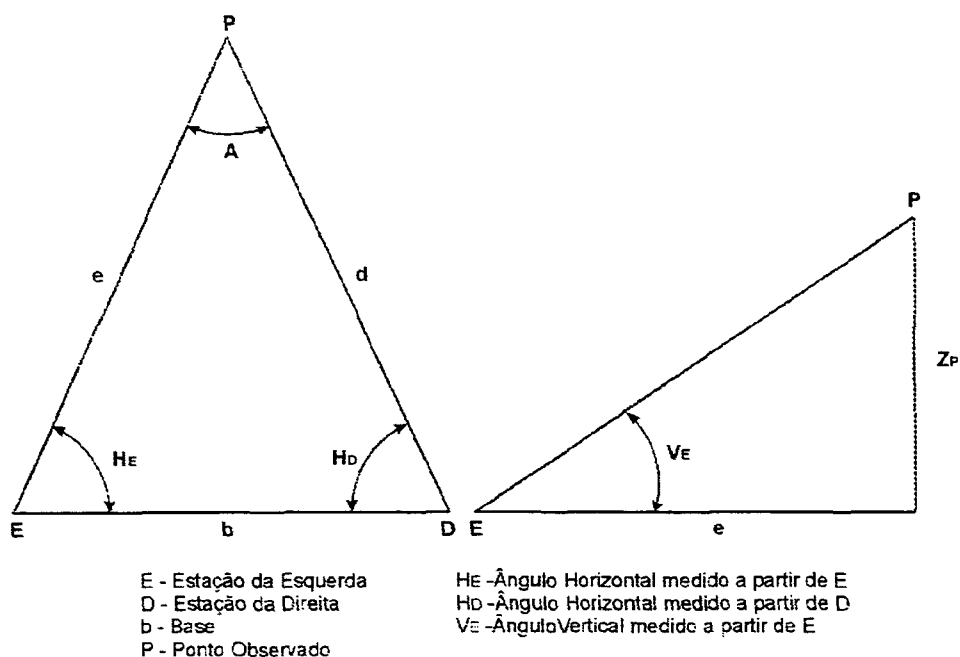
$$y = c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (06)$$

3.4 PONTOS DE APOIO

O controle de campo em Fotogrametria é necessário para materializar o referencial do espaço objeto assim como estabelecer a posição e orientação de cada fotografia no espaço, ou seja determinar os parâmetros de orientação exterior de uma ou mais fotografias, permitindo a correspondência entre os espaços imagem e objeto.

A determinação das coordenadas (X , Y , Z) dos pontos de apoio em Fotogrametria Terrestre é normalmente realizada por levantamentos topográficos, utilizando o método de interseção à vante, que segundo BLACHUT et al. (1979) e RITCHIE et al. (1988), consiste na determinação das coordenadas de pontos através de observações angulares a partir, de no mínimo, duas estações conhecidas, conforme figura 9.

FIGURA 9 - INTERSEÇÃO À VANTE



Os pontos de apoio podem ser pré-sinalizados ou “naturais”, isto é, feições do monumento, como por exemplo, cantos de portas ou janelas. A materialização de um sistema de referência tridimensional, como o do sistema do espaço objeto, implica em um mínimo de três pontos com coordenadas conhecidas.

3.5 CÂMERAS FOTOGRAMÉTRICAS

Antes de iniciar um levantamento fotogramétrico é necessário escolher e conhecer a câmera a ser utilizada. Dentre as câmeras utilizadas em Fotogrametria existem as métricas, as semi-métricas e as não-métricas. Nos levantamentos aerofotogramétricos convencionais as câmaras métricas são utilizadas por possuírem geometria interna estável, alto poder resolutivo, mecanismo de planificação do filme, além de possuírem marcas fiduciais, importantes para a orientação das fotografias.

Em oposição às câmeras métricas, as semi-métricas e as não-métricas possuem como vantagens o custo reduzido, a flexibilidade da distância focal, portabilidade, disponibilidade e facilidade de manuseio. Estas câmeras, porém, apresentam distorções maiores e irregulares, instabilidade na orientação interior, não possuem marcas fiduciais e são desprovidas de níveis e limbos graduados que auxiliam à orientação (ATKINSON, 1989) e (FAIG, 1989).

As câmeras também podem ser classificadas em analógicas ou digitais. Na câmera digital a película fotográfica sensível é substituída por elementos fotodetectores. Estes fotodetectores são divididos em três grupos: varredura óptico-mecânica; arranjo linear e arranjo matricial. Os dois primeiros grupos são comuns na coleta de imagens de satélite a partir

de plataformas orbitais. As câmeras com fotodetectores em arranjo matricial são as mais usuais em aplicações a curta distância (GRUEN, 1987) e (GALO, 1993).

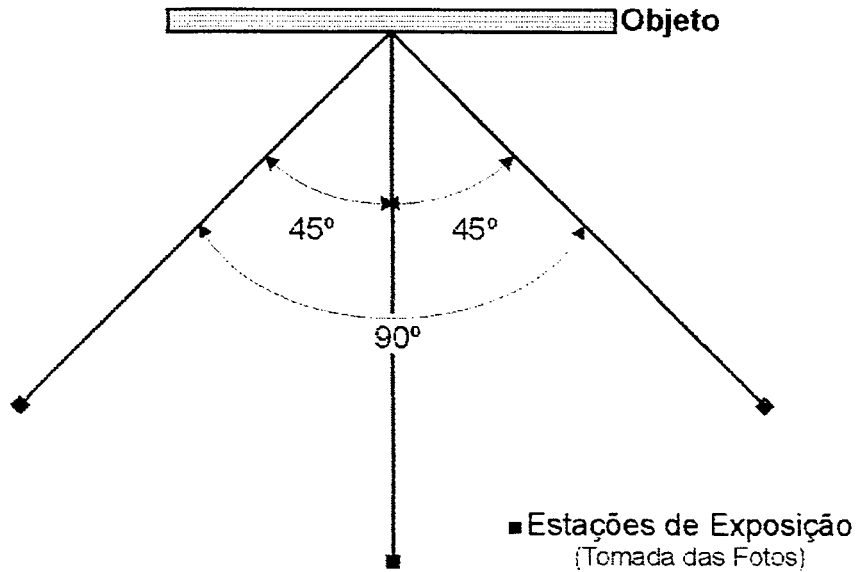
3.5.1 Calibração de Câmeras

O procedimento para determinação de um conjunto de parâmetros (características individuais) inerentes à câmera, os quais permitem a reconstrução do feixe perspectivo que deu origem à imagem, denomina-se calibração da câmera (OLIVAS, 1980), (MITISHITA, 1990), (TOMMASELLI, 1991) e (GALO, 1993).

Existem vários métodos (de laboratório e de campo) desenvolvidos para calibração de câmeras fotogramétricas. Em Fotogrametria Terrestre várias técnicas de calibração foram desenvolvidas, desde um simples teste geométrico até as de alta precisão. O método mais utilizado para calibração de câmeras em Fotogrametria Terrestre é o das câmeras convergentes, desenvolvido por Duane Brown. O método baseia-se na utilização de fotografias que tenham um alto grau de convergência e que existam exposições com ângulos kapa (χ) nominalmente ortogonais (OLIVAS, 1980).

A configuração ideal da convergência das fotografias é de 90° e que em ao menos uma exposição o ângulo χ seja girado também de 90° , de maneira a separar os coeficientes da distorção radial simétrica dos da distorção descentrada. A configuração mínima do método de câmeras convergentes exige três fotografias, conforme esquematizado na figura 10.

FIGURA 10 - CONFIGURAÇÃO IDEAL DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO NO
MÉTODO DE CÂMERAS CONVERGENTES



O modelo matemático aplicado ao método de calibração por câmeras convergentes consiste das equações de colinearidade (ver 3.3) acrescidas dos parâmetros de distância focal Gaussiana, coordenadas do ponto principal, coeficientes das distorções das lentes (radial simétrica e descentrada). Os coeficientes das distorções das lentes foram modelados por CONRADY (1919) e BROWN (1981), cujos desenvolvimentos podem ser encontrados em ANDRADE (1981) e MERCHANT (1978).

$$x = x_0 + \Delta x + c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (07)$$

$$y = y_0 + \Delta y + c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

sendo:

x_0 e y_0 as coordenadas do ponto principal no referencial fiducial

Δx e Δy as distorções das lentes (radial simétrica e descentrada) definidas por:

$$\Delta x = \delta x_r + \delta x_d$$

$$\Delta y = \delta y_r + \delta y_d$$

(08)

onde:

δx_r e δy_r = distorção radial simétrica;

δx_d e δy_d = distorção descentrada;

$$\delta x_r = (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6)x$$

$$\delta y_r = (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6)y$$

$$\delta x_d = P_1 \cdot (r'^2 + 2 \cdot x'^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x' \cdot y'$$

$$\delta y_d = P_2 \cdot (r'^2 + 2 \cdot y'^2) + 2 \cdot P_1 \cdot x' \cdot y'$$

(09)

sendo:

k_1 , k_2 e k_3 = parâmetros da distorção radial simétrica;

P_1 e P_2 = parâmetros da distorção descentrada;

x e y = coordenadas no sistema fotogramétrico;

x' e y' = coordenadas no sistema fotogramétrico corrigidas da distorção radial simétrica.

3.6 FOTOTRIANGULAÇÃO

Fototriangulação é definida, de acordo com SLAMA et al. (1980), como o processo de densificação do controle horizontal e/ou vertical, através de mensurações sobre fotografias adjacentes, utilizando-se relações geométricas existentes entre elas.

A fototriangulação tem como objetivo gerar coordenadas precisas de pontos do espaço objeto, a partir de coordenadas medidas em fotografias e de um mínimo de informações do sensor, além de pontos do espaço objeto com coordenadas conhecidas (pontos de apoio) para materializar o referencial (LUGNANI, 1987). No domínio analítico, a fototriangulação baseia-se nas equações de colinearidade, cujo desenvolvimento foi apresentado em 3.3.

Quando os parâmetros da câmera (distância focal, coordenadas do ponto principal, coeficientes das distorções radial simétrica e descentrada) não são conhecidos, podem ser obtidos simultaneamente às coordenadas de pontos do objeto, no processo denominado de auto-calibração.

A fototriangulação com auto-calibração consiste de um ajustamento com parâmetros adicionais. As equações de colinearidade (equações 06), utilizadas na fototriangulação são modificadas pela adição de parâmetros que modelam as distorções das lentes (equações 07), apresentadas em 3.5.1.

3.7 RESTITUIÇÃO FOTOGRAMÉTRICA

A restituição fotogramétrica é definida como o processo de reconstrução de uma superfície ou objeto a partir de mensurações em fotografias, com o objetivo de representá-lo gráfica ou numericamente. O processo é efetuado através de

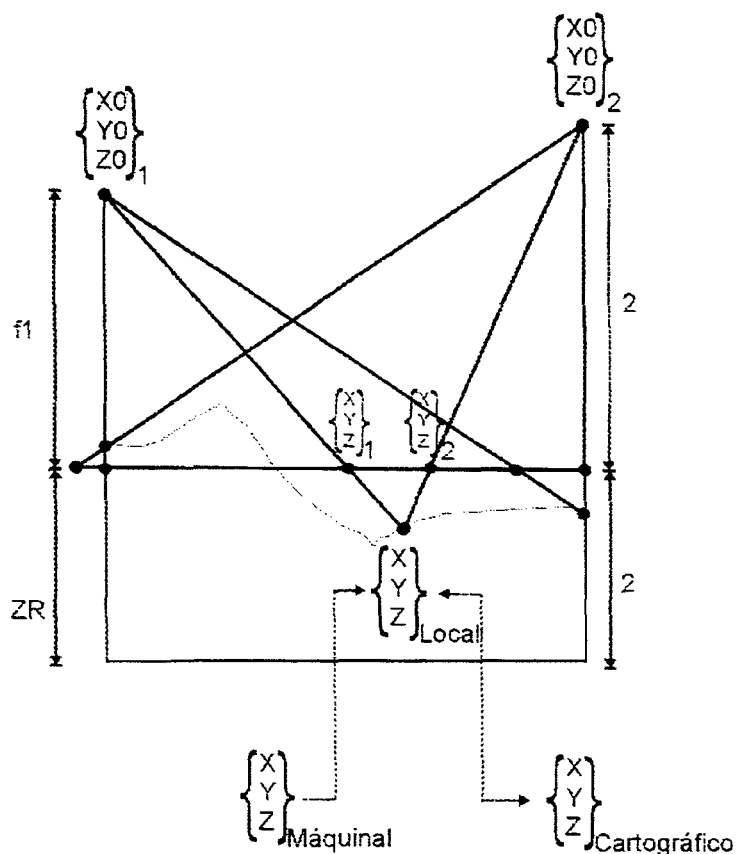
fotografias devidamente orientadas (orientação interior e exterior), das quais se extrai as feições desejadas.

O produto da restituição é denominado de original fotogramétrico, o qual é obtido através de estereorestituidores ou monorestituidores. A estereorestituição é baseada na utilização simultânea de duas fotografias de um mesmo objeto, porém, obtidas com centros de perspectiva diferentes. Estas fotografias devidamente combinadas produzem a sensação da visão tridimensional, resultado de uma ilusão ótica.

Esta ilusão ótica é criada pelo princípio da visão estereoscópica, onde a imagem de um objeto é formada por duas de suas imagens tomadas de pontos distintos (LaPRADE, 1980). Os aparelhos restituidores são produzidos de maneira similar à visão humana e permitem a reconstrução dos raios que formaram a imagem. Estes aparelhos são formados por dois projetores que após reconstruírem a posição da câmera no instante da tomada das fotografias, formam um modelo tridimensional do objeto fotografado.

Na Fotogrametria Digital este modelo tridimensional é formado matematicamente. Todas as operações realizadas nos aparelhos restituidores podem ser programadas e processadas em computadores. Quando estes computadores são dotados de periféricos específicos, são então chamados de estações de trabalho. Se estas estações de trabalho processam programas de restituição ou estereocompilação podem ser denominadas de restituidores digitais (ANDRADE, 1998). A figura 11 ilustra um restituidor digital.

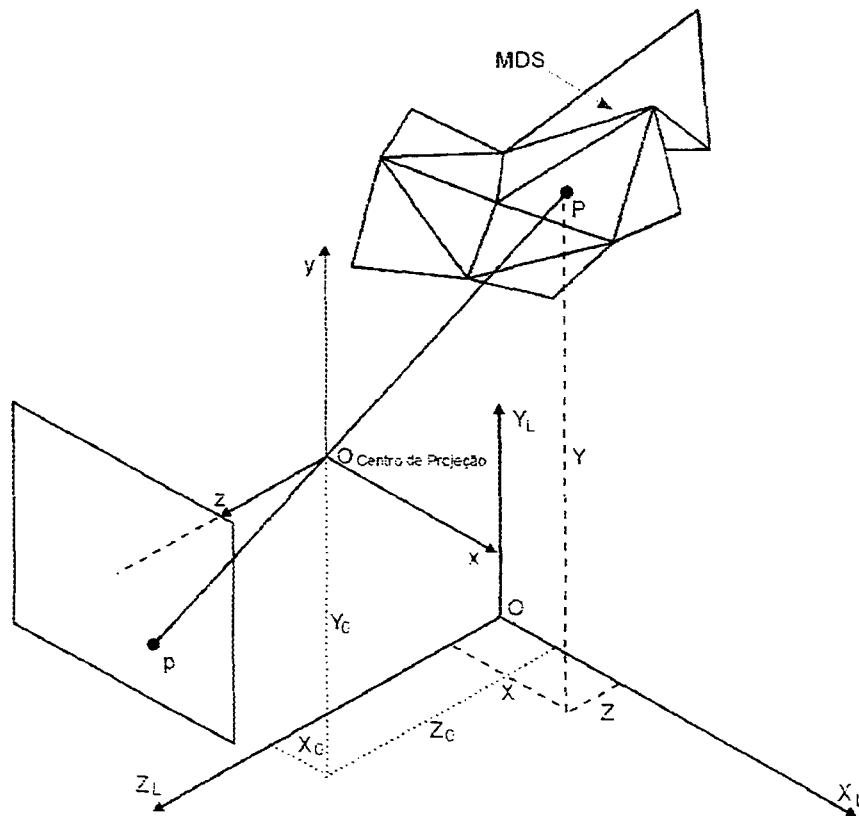
FIGURA 11 - RESTITUIDOR DIGITAL



Fonte: Andrade, 1998

O método de monorestituição pressupõe a solução do problema em uma única fotografia, na qual são extraídas as feições desejadas para representar o objeto considerado. Segundo MITISHITA (1997) e FRAGASSI (1998) a fundamentação matemática básica do método foi concebida por Makarovik em 1973 e consiste em transformar coordenadas fotogramétricas em coordenadas tridimensionais do espaço objeto. O conceito reside na interseção da reta definida pelo centro de projeção, ponto objeto e ponto imagem, denominada de reta da colinearidade, com a superfície do objeto fotografado (MDT ou MDS), conforme mostrado na figura 12.

FIGURA 12 - INTERSEÇÃO DA RETA DA COLINEARIDADE COM O MDS



A monorestituição consiste, de acordo com MITISHITA (1997), da aplicação de um conjunto de transformações matemáticas que possibilita a obtenção da representação gráfica de um objeto, a partir da digitalização vetorial de suas feições. A principal transformação (retificação vetorial) do método baseia-se nas equações de colinearidade, na sua forma inversa:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{11}X + m_{12}Y + m_{13}C}{m_{13}X + m_{23}Y + m_{33}C}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{12}X + m_{22}Y + m_{23}C}{m_{13}X + m_{23}Y + m_{33}C}$$
(10)

sendo:

(x, y, c) = coordenadas do ponto p do espaço imagem no referencial fotogramétrico;

(X, Y, Z) = coordenadas do ponto P do espaço objeto no referencial local;

(X_0, Y_0, Z_0) = coordenadas do centro de projeção no referencial local;

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} =$$
 elementos da matriz de rotação M , necessária para deixar os referenciais (fotogramétrico e local) paralelos entre si.

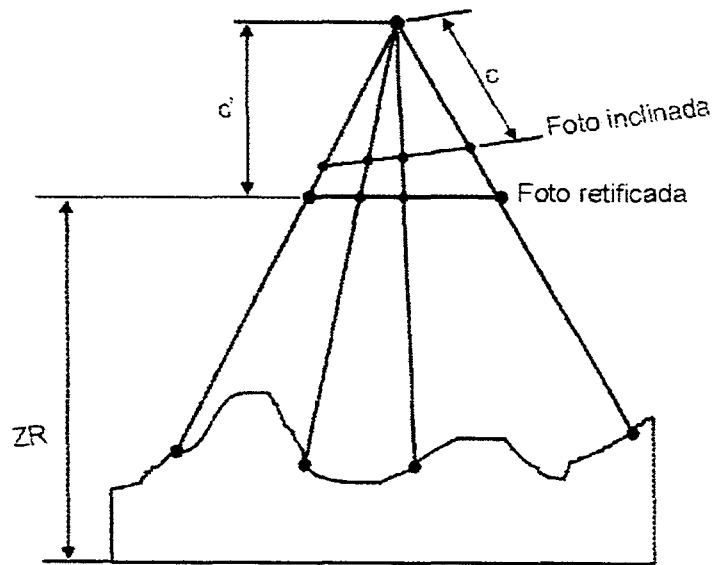
Através da figura 12 e das equações 10, verifica-se a importância do conhecimento do MDS para representar graficamente um objeto através da monorestituição. A geração do MDS é o principal problema encontrado na monorestituição aplicada à Arquitetura, devido a detalhes não imageados e descontinuidades na superfície.

3.8 RETIFICAÇÃO DE IMAGENS

A representação de elevações arquitetônicas, através de métodos fotogramétricos, pode ser obtida nas formas vetorial (restituição) e raster (retificação de imagens). A representação vetorial apresenta um determinado grau de abstração e representação raster apresenta todos os detalhes da superfície (PALLASKE, MARTEN & MAUELSHAGEN, 1992).

A retificação de uma imagem consiste em projetá-la, segundo seu próprio feixe perspectivo, em um plano horizontal, como pode ser observado na figura 13, tomando nulos seus ângulos φ e ω . No processo de retificação também é possível alterar os valores do ângulo χ e da distância focal, que significa alterar a escala da fotografia (ANDRADE, 1998).

FIGURA 13 - RETIFICAÇÃO DE IMAGENS



Fonte: Andrade, 1998.

Uma imagem retificada, denominada de vertical, constitui um sistema de projeção cônico, tendo o plano do negativo (ou do diapositivo) perpendicular à reta definida pela distância focal da câmera (c'). Qualquer feição que esteja situada no plano em que foi retificada a imagem aparecerá em verdadeira grandeza; feições que estejam entre o centro de projeção do sistema e o plano projetivo aparecerão maiores do que seu real valor.

3.8.1 Ortofoto

Para que uma representação, seja vetorial ou raster, constitua um produto em que possam ser efetuadas medidas a respeito dos objetos representados, deve constituir um sistema de projeção cilíndrico ortogonal, que possui como propriedade apresentar a verdadeira grandeza das feições que aparecem paralelas ao plano de projeção.

A geração de uma imagem fotográfica com características métricas constitui uma valiosa ferramenta para coleta de informações sobre um objeto. A ortofoto é uma imagem ortográfica de objetos cuja textura, cor ou tons de cinza da fotografia original são preservados (BARATIN et al., 2000).

O modelo matemático aplicado na geração de ortofotos é igual ao apresentado nas equações 10, mostradas em 3.7. Estas equações correspondem às equações de colinearidade na sua forma inversa, onde coordenadas planas de pontos do espaço objeto são obtidas a partir de suas homólogas no espaço imagem; coordenadas do centro de projeção no referencial do espaço objeto; e coordenada Z no referencial do espaço objeto. Esta coordenada (Z) é obtida a partir do conhecimento do MDS da superfície do objeto fotografado.

3.9 GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE

Conforme apresentado em 3.7 e 3.8.1, o modelo matemático utilizado para gerar uma representação gráfica de um objeto, quer por monorestituição ou por ortoprojeção, requer o conhecimento de um modelo matemático que represente sua superfície, denominado de modelo digital da superfície – MDS.

Segundo LANDES, BÄHR & RINGLE (1996), o MDS influencia diretamente a qualidade das ortofotos (ou do produto da monorestituição). Caso o modelo não represente a superfície com fidelidade, o produto resultante apresentar-se-á distorcido.

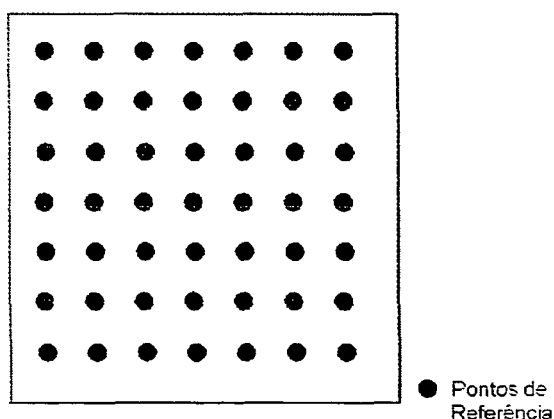
O processo de modelagem de uma superfície, de acordo com MITISHITA (1997) envolve diferentes fases: obtenção das informações; elaboração do modelo; e sua aplicação.

3.9.1 Obtenção das Informações

O MDS consiste de uma estrutura de dados que representa a forma da superfície arquitetônica, sendo obtido através de uma amostragem de pontos, denominados de pontos de referência (tridimensionais). Estes pontos são tradicionalmente coletados por meio de métodos topográficos ou então são derivados da Fotogrametria através de observações estereoscópicas.

A coleta destes pontos de referência pode ser obtida de forma regular ou irregular. Quando os pontos de referência estão distribuídos de forma regular a representação da superfície é armazenada como uma matriz bidimensional, denominada de malha regular, tendo espaçamento constante entre linhas e colunas. A figura 14 representa uma malha regular de pontos de referência utilizados para gerar MDS's.

FIGURA 14 - AMOSTRAGEM POR MALHA REGULAR

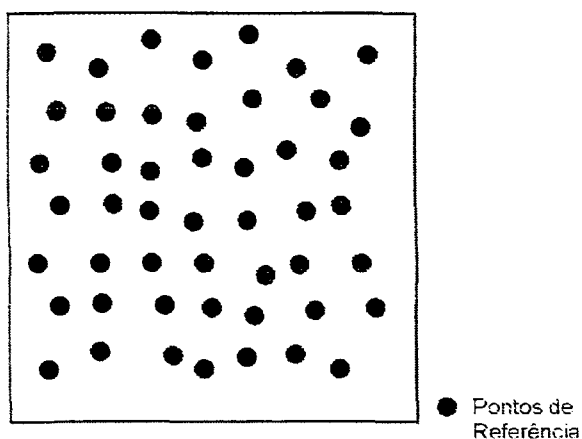


As estruturas em forma de malha regular têm como desvantagem a grande quantidade de dados redundantes quando a superfície é uniforme e a escassez de dados para superfícies menos uniformes. Os pontos amostrados, normalmente não coincidem com as discontinuidades da superfície, não sendo possíveis de serem modeladas.

Quando os pontos de referência não estão regularmente distribuídos, constituem uma estrutura denominada de malha irregular, onde a amostragem obtida em forma matricial considera as características da superfície, aumentando ou diminuindo o espaçamento entre os pontos amostrados. Quanto mais homogênea for a superfície maior será o espaçamento entre os pontos de referência e quanto mais heterogênea, menor será este espaçamento.

Quando os pontos de referência são obtidos nas discontinuidades da superfície constituem uma estrutura baseada em pontos aleatórios, também denominados de pontos independentes. A figura 15 representa uma amostragem por pontos aleatórios.

FIGURA 15 - AMOSTRAGEM POR PONTOS ALEATÓRIOS

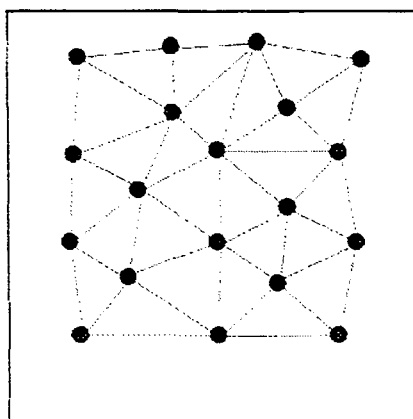


3.9.2 Elaboração do Modelo

De acordo com MITISHITA (1997), existem vários processos para elaborar modelos digitais, que de forma geral, consistem em agrupar os pontos de referência, que descrevem a superfície real. Este agrupamento interliga os pontos de referência, gerando uma superfície poliédrica.

O modelo digital mais empregado na representação matemática de superfícies corresponde à triangulação, que consiste de um poliedro de faces triangulares, cujos vértices correspondem aos pontos de referência. A superfície deste poliedro é denominada de rede irregular triangulada e representa o MDS do objeto fotografado. A figura 16 mostra a rede irregular triangulada de uma superfície

FIGURA 16 - REDE IRREGULAR TRIANGULADA



3.9.3 Aplicação do Modelo

O modelo gerado, conforme apresentado no item anterior, constitui uma superfície poliédrica, da qual são conhecidas as coordenadas tridimensionais de seus vértices (pontos de referência). A aplicação do modelo consiste em determinar as coordenadas de qualquer ponto da superfície, através de algoritmos de interpolação. Existem vários algoritmos interpoladores, que de acordo com MITISHITA (1997), baseiam-se em uma vizinhança limitada de pontos de referência (denominados de interpoladores locais) ou em uma vizinhança ilimitada de pontos (interpoladores globais).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Fotogrametria é uma poderosa ferramenta para obtenção de informações a respeito de objetos ou superfícies devidamente fotografados. Com o objetivo de especificar e avaliar produtos fotogramétricos digitais utilizados em cadastramento de monumentos arquitetônicos foi escolhida uma edificação histórica, localizada no centro da cidade de Curitiba, cadastrada pelo município como Unidade de Interesse de Preservação, denominada neste trabalho de Monumento Teste. A elevação (fachada) principal do Monumento Teste, foi fotografada com uma câmera *Rolleiflex 6006* e as fotografias obtidas foram convertidas para meio digital utilizando um *scanner* fotogramétrico da marca *WERHLI*, com resolução ótica de 2500 dpi (*dots per inch*).

Foram determinados pontos de apoio com a finalidade de materializar o sistema de coordenadas do espaço objeto, assim como permitir a determinação dos parâmetros de calibração da câmera. Estes pontos foram obtidos por levantamento topográfico utilizando dois equipamentos distintos: uma estação total (TC 2002 – *Leica*) e um teodolito eletrônico (T100 – *Leica*). As coordenadas foram calculadas através de programas desenvolvidos nos *softwares Microsoft Excel* e *MATLAB*.

Foram elaborados quatro produtos fotogramétricos, empregando diferentes técnicas: estereorestituição, monorestituição, retificação de imagens e ortoprojeção. A obtenção de qualquer um deles pressupõe o conhecimento de coordenadas de pontos do espaço objeto assim como dos parâmetros calibrados da câmera

fotogramétrica, que foram obtidos através de uma fototriangulação com auto-calibração, através do programa computacional *FOTTER*.

As coordenadas dos pontos de controle e fotogramétricos, no referencial instrumental, foram medidas manualmente nas imagens digitais através de um programa *MDL* do *Sistema Monorestituidor Digital*, integrado ao sistema de computação gráfica *MicroStation PC*. As coordenadas foram então transformadas para o sistema fiducial, através de diferentes modelos matemáticos, utilizando programas elaborados no software *MATLAB*.

A estereorestituição foi produzida na empresa *Engefoto*, através de um estereorestituidor digital. Neste mesmo equipamento foram determinados pontos de referência com coordenadas tridimensionais para gerar o Modelo Digital da Superfície – DSM, necessário para produção de ortofotos e geração da monorestituição. A monorestituição digital do monumento teste foi gerada no sistema *Monorestituidor Digital*. A fotografia retificada e a ortofoto foram geradas com o programa *OrthoKosmos* da *Geokosmos*.

4.2 MONUMENTO TESTE

A elevação frontal da Casa de Ignácio de Paula França (conhecida atualmente por Solar do Rosário) foi escolhida para a elaboração desta pesquisa. A edificação foi construída, de acordo com GONÇALVES et. al. (1986), entre 1887 e 1891, servindo como residência da Família de Ignácio de Paula França até 1940. Em 1974 passou por um processo de restauro e posteriormente seu uso foi adaptado para atender às atividades de uma escola de língua germânica.

Em 1989, segundo www.solardorosario.com.br, a casa foi entregue a uma entidade sem fins lucrativos, com o objetivo de resgatar sua memória, passando por um novo processo de restauro, concluído em 1992, sendo então inaugurada como espaço de arte e cultura. Hoje, o Solar do Rosário é uma iniciativa privada em forma associativa que abriga um espaço particular vivo e atuante de arte e cultura. Constitui um complexo cultural que envolve galeria de arte, cursos, oficinas, livraria, molduraria, restaurante, casa de chá e jardim de esculturas.

A casa foi construída originalmente em dois pavimentos, tendo sua elevação frontal aproximadamente 10 metros de altura por 10 metros de largura, apresentando como característica principal a simetria de suas feições. O pavimento térreo possui cinco janelas em arco, emolduradas e encimadas por frisos, que correm horizontalmente na fachada, à altura da base dos arcos. Sob as janelas, a alvenaria forma um retângulo, que completa o desenho da janela até a linha do piso. Sob esta linha existem cinco respiros do porão (um sob cada janela).

O pavimento superior é contornado por volutas (característica da arquitetura de imigração alemã). Na parte central existem três portas que se abrem para uma sacada de ferro exaustivamente trabalhada. Estas portas têm como fundo um retângulo dividido em três partes, com relevos de alvenaria imitando colunas. A figura 17 mostra a elevação frontal do Solar do Rosário, que passará a ser designada neste trabalho por fachada principal do monumento teste.

FIGURA 17 - FACHADA PRINCIPAL DO SOLAR DO ROSÁRIO



4.3 LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE APOIO

A determinação dos pontos de apoio foi realizada pelo método topográfico de interseção à vante. Estabeleceu-se duas estações de observação (A e B) sendo a distância entre elas denominada de base do levantamento. A figura 18 esquematiza a relação geométrica entre a base e a fachada do monumento.

Foram selecionados 12 (doze) pontos nas feições da fachada (cantos de portas e detalhes arquitetônicos) como apoio. A distribuição destes pontos foi determinada de maneira a cobrir toda a superfície de interesse e pode ser observada na figura 19.

FIGURA 18 - LOCALIZAÇÃO DA BASE EM RELAÇÃO À FACHADA

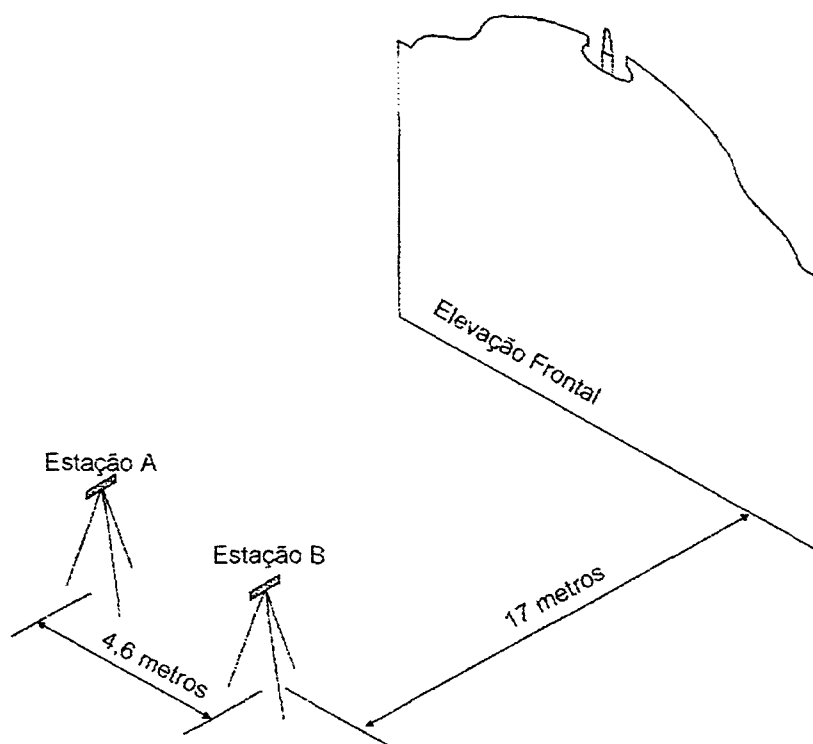
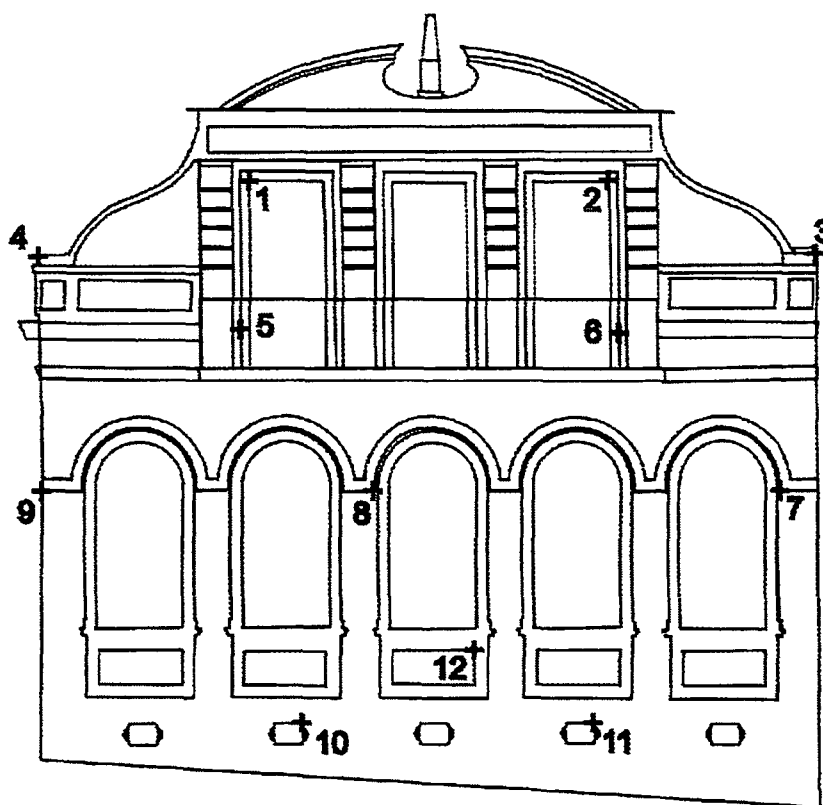


FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO NA FACHADA



O procedimento de campo, para o cálculo das coordenadas dos pontos de apoio, consistiu em medições angulares horizontais e zenitais a partir das estações de observação. Os ângulos horizontais foram determinados pela diferença entre a direção observada da base e as direções dos pontos pré-selecionados. Cada direção foi medida três vezes, através de reiteração, com o objetivo de minimizar possíveis erros instrumentais e de observação. Cada série constituiu observações nas duas posições permitidas pelos equipamentos topográficos: posição direta (PD) e posição invertida (PI).

Quanto ao instrumental topográfico, foram utilizados dois equipamentos em levantamentos distintos, porém ocupando as mesmas estações base: uma estação total Leica TC 2002 com prisma na medição da distância da base e um teodolito eletrônico (T100) da Leica, com uma trena para medir a base. As especificações de ambos os instrumentos são mostrados na tabela 01.

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS TOPOGRÁFICOS

Características	TC – 2002	T – 100
Aumento da Luneta	32 x	30 x
Abertura Efetiva	42 mm	45 mm
Distância Mínima do Foco	1,7 m	0,85 m
Fator de Multiplicação	100	100
Constante Aditiva	0	0
Tipo de Medida Angular	Incremental	Incremental
Leitura Mínima	0,5"/0,15 mgom	10"/20cc
Acurácia – DIN 18723	1"	10"

4.3.1 Cálculo das Coordenadas

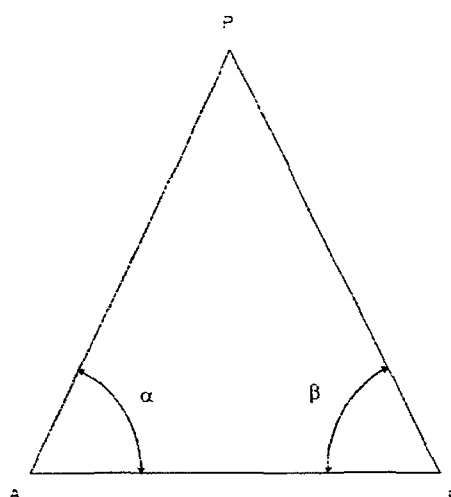
As coordenadas foram calculadas de duas maneiras distintas: a primeira denominada de interseção plana considera que as retas definidas pelas direções observadas a partir das duas estações são concorrentes, portanto têm um ponto em comum; a segunda, denominada de interseção espacial, considera estas retas como reversas, devido aos erros inerentes ao levantamento. As soluções para os dois métodos de cálculo são mostradas na sequência.

Considerando que as retas definidas pelas direções observadas têm um ponto em comum, as coordenadas planas deste ponto podem ser calculadas através das seguintes fórmulas:

$$\begin{aligned} X_P &= X_A + \overline{AP} \cdot \cos \alpha \quad \text{ou} \quad X_P = X_B + \overline{BP} \cdot \cos \beta \\ Y_P &= Y_A + \overline{AP} \cdot \sin \alpha \quad \text{ou} \quad Y_P = Y_B + \overline{BP} \cdot \sin \beta \end{aligned} \quad (11)$$

Sendo α o ângulo horizontal observado a partir da estação A e β o ângulo horizontal observado a partir da estação B, conforme mostrado na figura 20.

FIGURA 20 - INTERSEÇÃO PLANA



A terceira coordenada do ponto P pode ser calculada através dos ângulos zenitais observados nas estações A e B, denominados de α' e β' respectivamente.

$$Z_P = \frac{\cot \alpha' \cdot \overline{AP} + \cot \beta' \cdot \overline{BP} + Z_A + Z_B}{2} \quad (12)$$

As direções observadas constituem, teoricamente, retas que se interceptam no espaço. Como na prática as observações estão sujeitas a erros, tais retas não mais se interceptam, podendo existir infinitas posições onde o ponto possa se situar. O método de interseção espacial minimiza a região de posicionamento deste ponto, pela teoria de que a menor distância entre duas retas é a perpendicular comum a ambas. Se ainda as observações forem consideradas de igual precisão, o ponto médio do segmento perpendicular será a solução do problema. (IBIAPINA et al., 1993).

Considerando as direções observadas nas estações como vetores (v_A e v_B), determina-se o vetor perpendicular a eles (p_{AB}) pelo seu produto vetorial:

$$p_{AB} = v_A \times v_B \quad (13)$$

Determina-se então o plano (π_{AB}) formado pelas retas definidas pelos vetores v_A e p_{AB} . As coordenadas de qualquer ponto do plano (π_{AB}) são fornecidas por:

$$x_{\pi AB} = x_A + s_{AB} x_{v_A} + t_{AB} x_{p_{AB}}$$

$$y_{\pi AB} = y_A + s_{AB} y_{vA} + t_{AB} y_{pAB} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
x_{r_B} &= x_B + m_B x_{v_B} \\
y_{r_B} &= y_B + m_B y_{v_B} \\
z_{r_B} &= z_B + m_B z_{v_B}
\end{aligned} \tag{15}$$

Sendo m_B parâmetro da reta r_B .

O ponto de interseção da reta r_B com o plano π_{AB} é uma das soluções para o ponto procurado, portanto podemos estabelecer as seguintes igualdades:

$$\begin{aligned}
x_{\pi_{AB}} &= x_{r_B} \\
y_{\pi_{AB}} &= y_{r_B} \\
z_{\pi_{AB}} &= z_{r_B}
\end{aligned} \tag{16}$$

Substituindo as equações (14) e (15) nas equações (16) temos o sistema de equações abaixo, definido por 3 equações e 3 incógnitas (s_{AB} , t_{AB} e m_B).

$$\begin{aligned}
s_{AB} x_{v_A} + t_{AB} x_{p_{AB}} - m_B x_{v_B} &= x_A - x_B \\
s_{AB} y_{v_A} + t_{AB} y_{p_{AB}} - m_B y_{v_B} &= y_A - y_B \\
s_{AB} z_{v_A} + t_{AB} z_{p_{AB}} - m_B z_{v_B} &= z_A - z_B
\end{aligned} \tag{17}$$

Calculados os valores das incógnitas e substituindo-os nas equações (14), ou nas equações (15) encontramos as coordenadas do ponto $P_A (x_{P_A}, y_{P_A}, z_{P_A})$.

Optando por substituir em (15), temos:

$$x_{PA} = x_B + m_B x_{vB}$$

$$y_{PA} = y_B + m_B y_{vB} \quad (18)$$

$$z_{PA} = z_B + m_B z_{vB}$$

De maneira análoga ao procedimento mostrado acima, determina-se o plano π_{BA} , definido pelos vetores p_{BA} e v_B , assim como a reta r_A que é definida pela direção do vetor v_A . O ponto $P_B (x_{PB}, y_{PB}, z_{PB})$ é dado pela interseção do plano π_{BA} com a reta r_A .

As coordenadas finais do ponto P (x_P, y_P, z_P) são dadas pela média das coordenadas dos pontos P_A e P_B :

$$x_P = \frac{x_{PA} + x_{PB}}{2}$$

$$y_P = \frac{y_{PA} + y_{PB}}{2} \quad (19)$$

$$z_P = \frac{z_{PA} + z_{PB}}{2}$$

A determinação das coordenadas dos pontos de apoio foi realizada num referencial cartesiano tridimensional local, adotando como origem o centro ótico do instrumento na estação de observação da esquerda (Estação A). O eixo X foi definido pela direção da base (direção AB), o eixo Z coincidente com a vertical da estação A e o eixo Y formando um terno cartesiano dextrógiro.

Aplicou-se às coordenadas dos pontos do espaço objeto obtidas do levantamento topográfico uma translação da origem e uma rotação em torno do

eixo X, de maneira a deixar o eixo Z correspondendo à profundidade das feições e o plano XY paralelo ao plano principal da fachada. Estas duas transformações (rotação e translação) foram agrupadas nas seguintes equações:

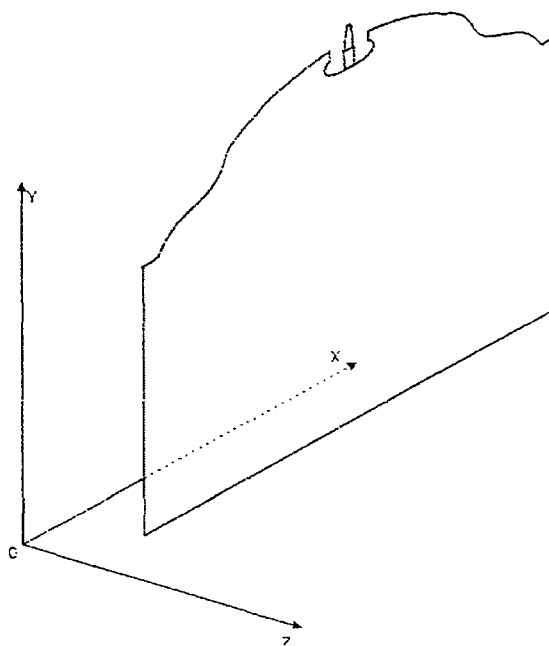
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

sendo (X, Y, Z) as coordenadas finais dos pontos do espaço objeto, (X_P, Y_P, Z_P) as coordenadas obtidas do levantamento topográfico e (X₀, Y₀, Z₀) os parâmetros de translação. Considerando $\alpha = 90^\circ$ as equações 20 resultam em:

$$\begin{aligned} X &= X_P + X_0 \\ Y &= Z_P + Y_0 \\ Z &= -Y_P + Z_0 \end{aligned} \quad (21)$$

Os parâmetros de translação foram determinados de maneira a deixar todos os pontos do espaço objeto com coordenadas positivas, ficando o referencial do espaço objeto, resultante das transformações matemáticas mostradas nas equações 20 e 21, conforme esquematizado na figura 22.

FIGURA 22 - SISTEMA DE COORDENADAS DO ESPAÇO OBJETO



4.4 TOMADA DAS FOTOGRAFIAS

O levantamento fotográfico foi realizado com a câmera semi-métrica *Rolleiflex 6006*, dotada de “*reseau*”, com distância focal nominal de 50 mm. A câmera possui quadro do negativo com dimensões de 6 x 6 cm, apresentando 121 marcas fiduciais distribuídas uniformemente.

Devido a não existência dos parâmetros de calibração da câmera, estes foram determinados através do processamento da fototriangulação com auto-calibração, utilizando o método de câmeras convergentes. Foram obtidas 4 fotografias, conforme configuração mostrada na figura 23. O método de câmeras convergentes baseia-se na utilização de fotografias com alto grau de convergência (fotos 1 e 4) e exposições com ângulo χ , nominalmente ortogonal (fotos 2 e 3). As

coordenadas aproximadas das estações de observação (tomada das fotografias) assim como os ângulos eulerianos aproximados das respectivas fotografias são mostrados na tabela 2.

As fotografias 2 e 3 foram obtidas da mesma estação de exposição porém obter a fotografia 3, rotacionou-se a câmera, em torno do eixo Z, de um valor de aproximadamente 90° , no sentido anti-horário.

FIGURA 23 - ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO DAS FOTOGRAFIAS

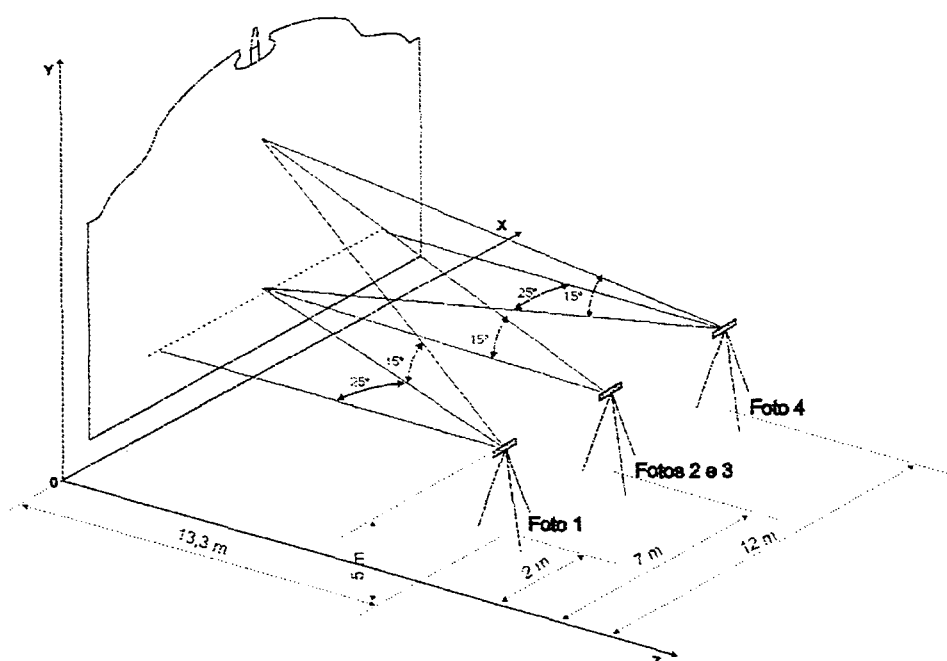


TABELA 2 - VALORES APROXIMADOS DAS COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E DOS ÂNGULOS EULERIANOS DAS FOTOGRAFIAS

Fotografia	x (m)	y (m)	z (m)	ω ($^\circ$)	φ ($^\circ$)	κ ($^\circ$)
1	2,0	5,0	13,3	15	-25	0
2	7,0	5,0	13,3	15	0	0
3	7,0	5,0	13,3	15	0	-90
4	12,0	5,0	13,3	15	25	0

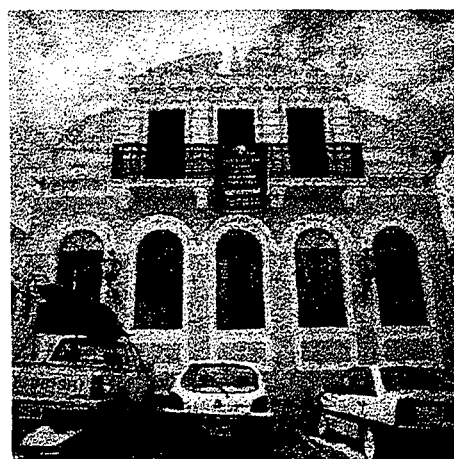
4.4.1 Digitalização das Fotografias

Após a revelação do filme fotográfico os negativos foram transformados para meio digital. A conversão analógica/digital foi realizada através do *scanner fotogramétrico WERHLLI*, com resolução óptica de 2500 *DPI*, gerando uma imagem com dimensão linear do *pixel* de 0,012 mm. A figura 24 mostra cada uma das quatro imagens obtidas no levantamento fotogramétrico convertidas para meio digital.

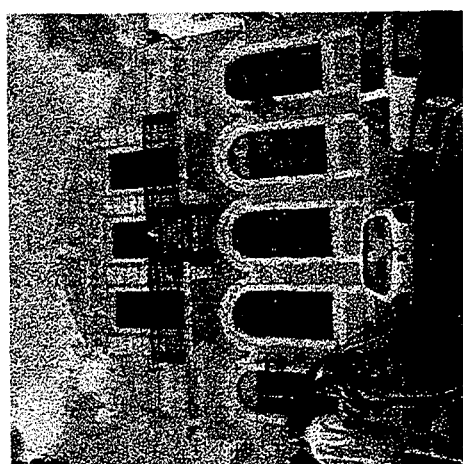
FIGURA 24 - LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO



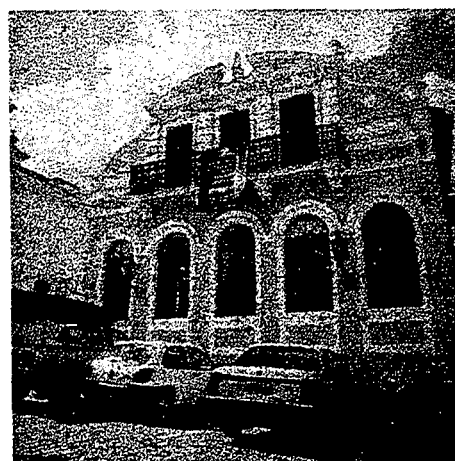
Fotografia 1



Fotografia 2



Fotografia 3



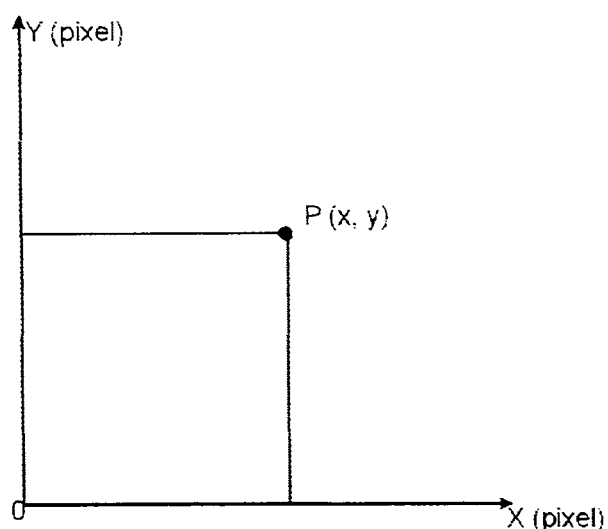
Fotografia 4

4.5 LEITURA DE COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS

As fotocoordenadas dos pontos de apoio (ver 4.3), pontos fotogramétricos e marcas do *reseau*, no referencial instrumental, foram obtidas através do módulo de leitura de pontos (programa MDL) do *Sistema Monorestituído Digital* associado ao sistema *MicroStation PC*. Cada ponto foi medido três vezes e a média foi tomada como representativa das coordenadas deste ponto. Os cálculos foram efetuados no *Software Microsoft Excel*, e serviram como dados de entrada para as operações subsequentes.

Como referencial instrumental tomou-se o sistema cartesiano bidimensional com origem no canto inferior esquerdo da imagem e as coordenadas obtidas correspondem à posição do *pixel* na matriz de células da imagem digital (linha, coluna), como mostrado na figura 25

FIGURA 25 - REFERENCIAL INSTRUMENTAL



4.5.1 Correção do Trabalho do Filme

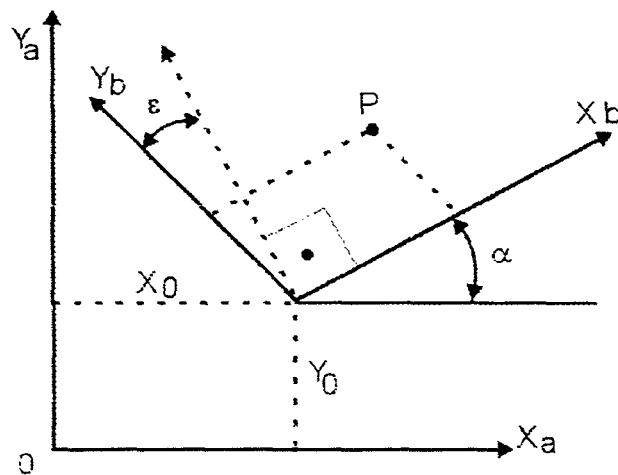
As condições de temperatura, umidade relativa do ar, tensão submetida ao filme e envelhecimento deste são as principais causas de deformações de um filme fotográfico (ANDRADE, 1998). Estas deformações, denominadas de trabalho do filme, são erros sistemáticos de causa conhecida que afetam a geometria da imagem e podem ser modelados e corrigidos matematicamente.

A correção das deformações causadas pelo trabalho do filme é realizada no momento em que se transforma matematicamente as coordenadas observadas do sistema instrumental para o sistema fiducial. Diferentes modelos matemáticos podem ser empregados nesta transformação porém independente do modelo utilizado é necessário que existam pontos de referência (marcas fiduciais ou marcas do *reseau*) na fotografia com coordenadas conhecidas em ambos os sistemas.

Aplicou-se nesta pesquisa dois diferentes modelos matemáticos (ambos no plano) para transformar as coordenadas do sistema instrumental para o sistema fiducial, com o objetivo de compará-los: transformação afim geral e transformação isogonal.

A transformação afim geral quando trabalhada em duas dimensões envolve seis parâmetros: dois de escala, dois de translação, um de não ortogonalidade entre os eixos e um de rotação. A figura 26 ilustra a transformação afim geral no plano e seus parâmetros.

FIGURA 26 - TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL



Para transformar um sistema de coordenadas B para um sistema de coordenadas A, pela transformação afim geral no plano o seguinte modelo matemático é utilizado:

$$x_a = \lambda_x \cdot x_b \cdot \cos \alpha + \lambda_y \cdot y_b \cdot \sin \alpha + x_0 \quad (22)$$

$$y_a = -\lambda_x \cdot x_b \cdot \sin(\alpha + \varepsilon) + \lambda_y \cdot y_b \cdot \cos(\alpha + \varepsilon) + y_0$$

sendo:

$\begin{bmatrix} x_a & y_a \end{bmatrix}^T$ = coordenadas do sistema A

$\begin{bmatrix} x_b & y_b \end{bmatrix}^T$ = coordenadas do sistema B

$\begin{bmatrix} \lambda_x & \lambda_y \end{bmatrix}^T$ = fatores de escala

$\begin{bmatrix} x_0 & y_0 \end{bmatrix}^T$ = parâmetros de translação

α = ângulo de rotação

ε = fator de não ortogonalidade entre eixos

Agrupando os parâmetros da transformação temos:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

A transformação isogonal, também conhecida como transformação de similaridade ou conforme de Helmert, é um caso particular da transformação afim geral. Quando se trabalha no plano, esta transformação é formada por quatro parâmetros: dois de translação, um de escala e um de rotação:

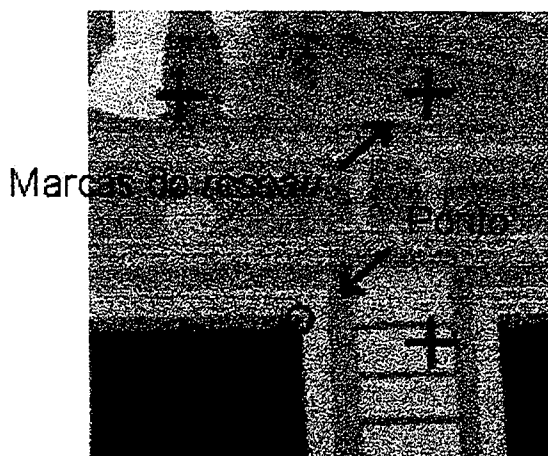
$$\begin{aligned} x_a &= \lambda \cdot x_b \cdot \cos \alpha + \lambda \cdot y_b \cdot \sin \alpha + x_0 \\ y_a &= -\lambda \cdot x_b \cdot \sin \alpha + \lambda \cdot y_b \cdot \cos \alpha + y_0 \end{aligned} \quad (24)$$

Agrupando o parâmetro de rotação com o fator de escala temos:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Os parâmetros das transformações afim geral e isogonal foram calculados, através de programas específicos gerados no *software MATLAB*, tendo como referência as quatro marcas do *reseau* mais próximas ao ponto, conforme mostrado na figura 27.

FIGURA 27 - MARCAS DO RESEAU



Os parâmetros das transformações afim geral e isogonal foram estimados através de um ajustamento de observações, aplicando o método dos mínimos quadrados – MMQ, o qual aceita como melhor estimativa dos parâmetros (X) o valor que torna mínima a soma dos quadrados dos resíduos (V), que em linguagem matricial pode ser escrita da seguinte forma (GEMAEL, 1994):

$$V^T V = \min \quad (26)$$

As referidas transformações matemáticas são lineares e vinculam parâmetros ajustados (X_a) a observações ajustadas (L_a), caracterizando modelos paramétricos, onde $L_a = F(X_a)$. O modelo matemático linearizado do método paramétrico é:

$$V = AX + L \quad (27)$$

Sendo V o vetor dos resíduos, X o vetor dos parâmetros, L o vetor das observações e A a matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros. Aplicando o MMQ ao modelo linearizado chegamos à seguinte expressão:

$$V^T V = (AX + L)^T (AX + L) = \min \quad (28)$$

Desenvolvendo a equação acima chega-se a seguinte expressão, que foi utilizada na determinação dos parâmetros modeladores das transformações matemáticas utilizadas para corrigir o trabalho do filme:

$$X = - (A^T A)^{-1} A^T L \quad (29)$$

Após a determinação dos parâmetros das transformações, as fotocoordenadas corrigidas foram obtidas, também no *software MATLAB*, aplicando as transformações matemáticas de maneira inversa. As equações 30 e 31 representam as transformações inversas da afin geral e da isogonal, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} x_{cor} \\ y_{cor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_{obs} - x_0 \\ y_{obs} - y_0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} x_{cor} \\ y_{cor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_{obs} - x_0 \\ y_{obs} - y_0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Calculou-se também as fotocoordenadas corrigidas do trabalho do filme aplicando uma transformação afin geral no plano utilizando como referência as 4 marcas principais do *reseau*. Após o processamento da fototriangulação, com fotocoordenadas corrigidas das três formas distintas (transformação afin geral

utilizando as quatro marcas mais próximas do *reseau*, transformação isogonal utilizando também as quatro marcas mais próximas do *reseau* e afim geral utilizando as quatro marcas principais) comparou-se as coordenadas ajustadas dos pontos de apoio e fotogramétricos, no espaço objeto, com o objetivo de avaliar possíveis discrepâncias.

4.6 PROCESSAMENTO DA FOTOTRIANGULAÇÃO

Com as coordenadas dos pontos de controle, no referencial do espaço objeto, valores aproximados dos pontos fotogramétricos neste mesmo referencial, coordenadas destes pontos (apoio e fotogramétricos) no referencial fiducial, valores aproximados das coordenadas do centro perspectivo (X , Y , Z) e de orientação de cada fotografia (ω , ϕ , κ) procedeu-se a etapa correspondente ao processamento da fototriangulação, efetuado no programa computacional *FOTTER* (ver SILVA, 1995).

Aplicou-se a técnica de fototriangulação com auto-calibração a fim de recuperar os parâmetros de calibração da câmera (f , x_0 , y_0 , k_1 , k_2 , k_3 , P_1 , P_2), assim como a atitude de cada fotografia (ω , ϕ , κ , X_0 , Y_0 , Z_0), simultaneamente ao ajustamento das coordenadas dos pontos fotogramétricos e de apoio no referencial do espaço objeto.

A fototriangulação foi processada três vezes: na primeira foram utilizadas coordenadas fiduciais dos pontos de apoio e fotogramétricos obtidas por transformação isogonal, tendo como referência na modelação dos parâmetros as quatro marcas do *reseau* mais próximas a cada um dos pontos considerados; na segunda as coordenadas fiduciais foram obtidas por transformação afim geral, tendo

também como referência na modelação dos parâmetros as quatro marcas mais próximas aos pontos; e na terceira as coordenadas no referencial fiducial foram obtidas por transformação afim geral, porém utilizando as quatro marcas principais do *reseau* fotogramétrico. Em todos os processamentos, os pontos 3, 4, 10, 11 e 12 não foram utilizados por não aparecerem em pelo menos duas fotografias. Os pontos 6 e 9 foram eliminados do processo devido a presença de erros grosseiros nas observações.

Com os resultados destes três processamentos foi possível compará-los, de maneira a verificar se as discrepâncias entre os valores resultantes são significativas para levantamentos fotogramétricos de monumentos arquitetônicos.

4.7 ELABORAÇÃO DOS PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS

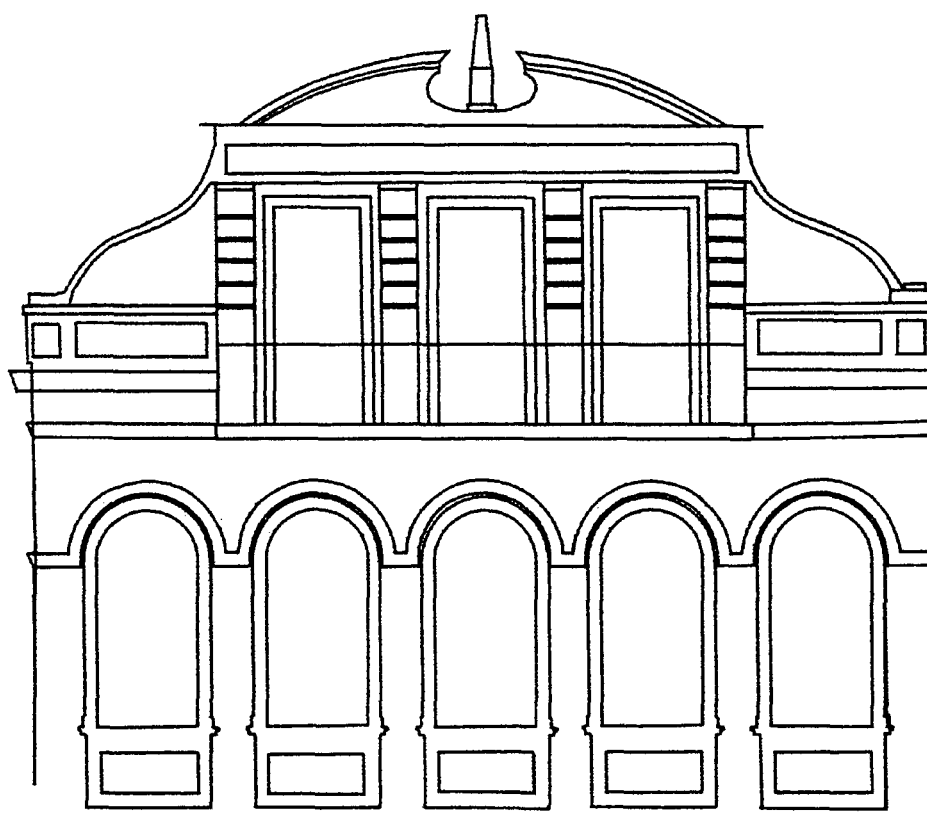
Um dos objetivos desta pesquisa consiste em comparar a precisão alcançada na elaboração dos seguintes produtos fotogramétricos: estereorestituição digital; monorestituição digital; fotografia retificada; e ortofoto digital. Além de compará-los quanto à precisão, verificou-se as vantagens e desvantagens do uso de cada um, estabelecendo critérios para a escolha do produto, de acordo com a necessidade do levantamento e características da construção. A seguir são apresentados os procedimentos utilizados na elaboração de cada produto.

4.7.1 Estereorestituição Digital

A estereorestituição foi realizada na empresa *Engefoto* em uma estação de trabalho digital (denominada de restituidor digital) baseada no método do estereoscópio. Neste método, duas imagens homólogas, devidamente orientadas, são colocadas lado a lado na tela do computador, formando um modelo de visão

tridimensional. As fotografias 1 e 2 foram escolhidas para a formação do modelo estereoscópico digital e as feições de interesse foram extraídas manualmente constituindo um arquivo gráfico tridimensional em meio digital, no sistema de computação gráfica *MicroStation PC*. A figura 28 mostra o resultado desta restituição.

FIGURA 28 - FACHADA RESTITUÍDA ESTEREOSCOPICAMENTE



Escala 1:100

4.7.1.1 Pontos de Referência para Geração do MDS

Com o mesmo modelo estereoscópico utilizado na estereorestituição foram coletados cerca de 3000 (três mil) pontos de referência, com coordenadas tridimensionais. Estes pontos foram coletados manualmente, em toda a extensão

da superfície fotografada, aumentando sua densidade nas linhas de descontinuidades. Estes pontos foram utilizados na geração de uma malha regular de pontos, sendo esta malha utilizada na elaboração do modelo digital da superfície – MDS.

4.7.2 Monorestituição

A monorestituição foi realizada no *Sistema Monorestituidor Digital* (ver MITISHITA, 1997), associado ao sistema de computação gráfica *MicroStation PC* e seu módulo de tratamento de imagens *Descartes*. Assim como na estereorestituição foram extraídas as feições de interesse, num arquivo gráfico vetorial.

O *Sistema Monorestituidor Digital* aplica técnicas da Fotogrametria Analítica e através de observações monoscópicas em imagens digitais, são realizados todos os procedimentos fotogramétricos necessários à monorestituição. O principal procedimento consiste em retificar o arquivo gráfico oriundo da extração de entidades, transformando-o para o sistema de coordenadas do espaço objeto.

A retificação é baseada nas equações de colinearidade (em sua forma inversa), que requerem o conhecimento de: coordenadas dos pontos do espaço imagem, no sistema fotogramétrico; coordenadas do centro de projeção e ângulos eulerianos da câmera, no referencial do espaço objeto; e coordenada referente à profundidade dos pontos (Z), no referencial do espaço objeto.

As coordenadas dos pontos no referencial fotogramétrico são obtidas a partir da orientação interna da fotografia, que tem por finalidade recuperar seu feixe perspectivo. A orientação interna é realizada através da leitura das marcas fiduciais,

no referencial instrumental, cujas coordenadas no referencial fiducial precisam ser conhecidas. Para transformar coordenadas do sistema instrumental para o fiducial, o *Sistema Monorestituidor Digital*, permite a utilização de diferentes transformações matemáticas: transformação afim geral no plano; transformação projetiva; ou polinômio de segundo grau. Neste trabalho, aplicou-se a transformação afim geral empregando quatro marcas principais do *reseau*, consideradas como marcas fiduciais.

A posição (coordenadas do centro de projeção no espaço imagem) e a orientação (ângulos de Euler) da câmera, em relação ao sistema de coordenadas do espaço objeto, são obtidas a partir da orientação espacial exata (orientação exterior) da fotografia. O processamento desta orientação requer coordenadas dos pontos de apoio, nos referenciais instrumental e local (espaço objeto).

O valor da profundidade de cada ponto do espaço objeto, no *Sistema Monorestituidor Digital*, é obtido através de um procedimento de interpolação altimétrica, a partir de um modelo digital da superfície – MDS, gerado a partir de pontos de referência tridimensionais. A qualidade do produto resultante da monorestituição depende da qualidade do MDS: se o modelo não representar a superfície com fidelidade, o produto não corresponderá à realidade.

Superfícies arquitetônicas são caracterizadas por descontinuidades, fator este que gera imperfeições na produção de MDS. Estas imperfeições inviabilizam a aplicação da monorestituição na representação gráfica de obras arquitetônicas. A solução encontrada para obter um produto através da extração monoscópica das feições de interesse do monumento teste foi “fatiar” a superfície por diferentes planos, paralelos ao plano principal da fachada.

Foram produzidos quatro arquivos vetoriais distintos, cada um correspondendo às feições arquitetônicas de mesma profundidade. Primeiramente extraiu-se as linhas arquitetônicas de interesse do plano principal da fachada, cujos pontos possuem profundidade média de 3 metros, sendo utilizados na retificação destas linhas, apenas pontos de apoio correspondentes a este plano. Após processadas todas as etapas da monorestituição obteve-se um arquivo gráfico vetorial com as feições referenciadas ao sistema de coordenadas do espaço objeto.

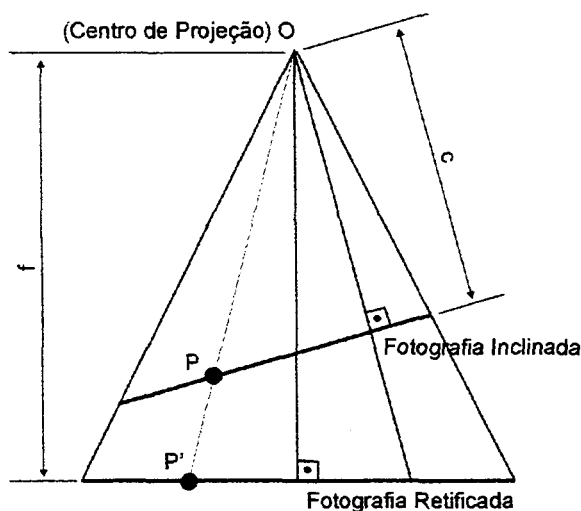
Em uma segunda etapa extraiu-se as feições de um segundo plano, paralelo ao plano principal da fachada, sendo a distância entre eles conhecida (6 cm). A partir de pontos de apoio referentes a este novo plano, realizou-se novamente a orientação exterior da fotografia e transformou-se as feições para o sistema de coordenadas do espaço objeto. Extraíu-se então, feições de um terceiro plano (distante 10 cm do principal) obtendo um novo arquivo gráfico vetorial, destas feições retificadas. Com as feições mais distantes do plano principal da fachada (72 cm) obteve-se um quarto arquivo vetorial cujas feições também foram retificadas. Ao final foram agrupados os quatro arquivos gráficos vetoriais em apenas um, o qual passou por um processo final de edição das feições.

4.7.3 Fotografia Retificada

Um dos produtos a ser analisado nesta pesquisa, de acordo com os objetivos preestabelecidos é a fotografia digital retificada, que se baseia numa representação *raster* em perspectiva central com ângulos ω e φ iguais a zero, isto é, a fotografia retificada corresponde a uma imagem com características métricas.

Foram retificadas as fotografias 1 e 2 do levantamento fotogramétrico, através do programa *OrthoKosmos* da empresa *Geokosmos*. A retificação é baseada em uma transformação matemática que relaciona coordenadas da fotografia inclinada (obtida do levantamento), com as coordenadas da fotografia retificada (vertical). O modelo matemático considera a colinearidade entre um ponto da imagem inclinada, seu homólogo na imagem retificada e o centro da projeção, conforme figura 29.

FIGURA 29 - COLINEARIDADE ENTRE FOTOGRAFIAS INCLINADAS E RETIFICADAS



Se considerarmos (x, y, c) como coordenadas fotogramétricas de um ponto P no referencial da imagem inclinada, (x', y', f) as coordenadas deste ponto no referencial da imagem retificada, (x_0, y_0) as coordenadas do ponto principal; e M a matriz de rotação, necessária para tornar os dois sistemas paralelos entre si, obtemos a seguinte expressão, utilizada para retificar fotografias:

$$x = x_0 - c \frac{m_{11}x' + m_{12}y' + m_{13}f}{m_{31}x' + m_{32}y' + m_{33}f} \quad (32)$$

$$y = y_0 - c \frac{m_{21}x' + m_{22}y' + m_{23}f}{m_{31}x' + m_{32}y' + m_{33}f}$$

Sendo m_{11} , m_{12} , ..., m_{33} , os elementos da matriz de rotação M , resultante do produto das matrizes de rotação $R_Z(\chi)$, $R_Y(\varphi)$ e $R_X(\omega)$, mostradas nas equações 4 e 5, e aqui rescritas para facilitar a leitura:

$$M = R_Z(\chi) \cdot R_Y(\varphi) \cdot R_X(\omega) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$R_X(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \text{sen } \omega \\ 0 & -\text{sen } \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$$

$$R_Y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\text{sen } \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$R_Z(\chi) = \begin{bmatrix} \cos \chi & \text{sen } \chi & 0 \\ -\text{sen } \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A figura 30, mostrada a seguir, mostra o produto resultante da transformação matemática utilizada na retificação da fotografia 2 do levantamento fotogramétrico.

FIGURA 30 - FOTOGRAFIA RETIFICADA



4.7.4 Ortofoto Digital

Uma ortofoto, conforme mostrado em 3.8.1, constitui um produto fotogramétrico raster, baseado em um sistema de projeção cilíndrico ortogonal, no qual podem ser realizadas medições das feições que estejam paralelas ao plano em que foram projetadas.

O processamento da ortofoto é semelhante ao realizado na monorestituição: baseia-se na aplicação das equações inversas da colinearidade (equações 10). Estas equações requerem o conhecimento das coordenadas do ponto do espaço

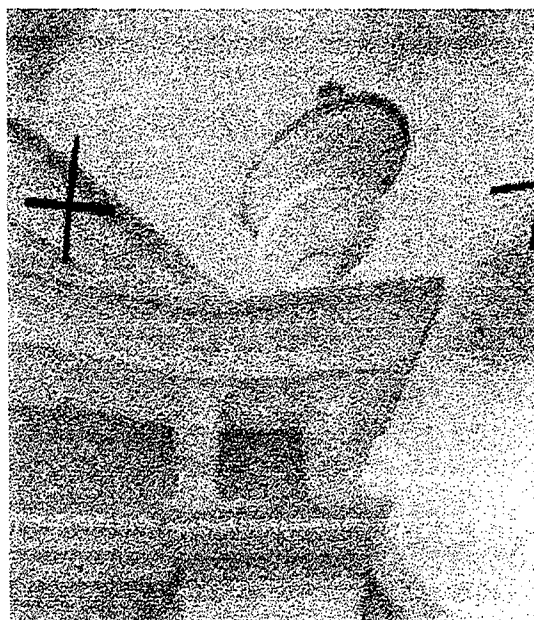
imagem no referencial instrumental e do espaço objeto no referencial local, da posição e orientação da câmera no referencial do espaço objeto, como também da coordenada do ponto, no referencial local, referente à profundidade (coordenada Z).

Esta coordenada é interpolada a partir de um modelo digital da superfície do objeto fotografado. O MDS utilizado na produção da ortofoto, foi produzido a partir dos pontos de referência obtidos estereoscopicamente (ver 4.7.1.1). A partir destes pontos foi gerada uma malha regular de pontos, cujo espaçamento entre linhas e colunas corresponde a 1 metro no referencial do espaço objeto.

O programa utilizado na geração da ortofoto (*OrthoKosmos*) foi elaborado para produzir ortofotos a partir de fotografias aéreas, sendo o valor de 1 metro para o espaçamento entre linhas e colunas da malha regular considerado suficiente. Para aplicações em Fotogrametria Arquitetônica este valor gera um MDS não representativo, gerando uma ortofoto com deformações, que podem ser observadas na figura 31.

Além da baixa densidade dos pontos de referência utilizados na geração do MDS, problemas relacionados às discontinuidades da superfície são encontrados. Na literatura são relatados problemas enfrentados na produção de ortofotos devido às discontinuidades, mesmo utilizando modelos da superfície tendo como referência malhas regulares mais densos, como por exemplo, espaçamento entre linhas e colunas de 2 cm.

FIGURA 31 - DISTORÇÕES APRESENTADAS NA ORTOFOTO DIGITAL



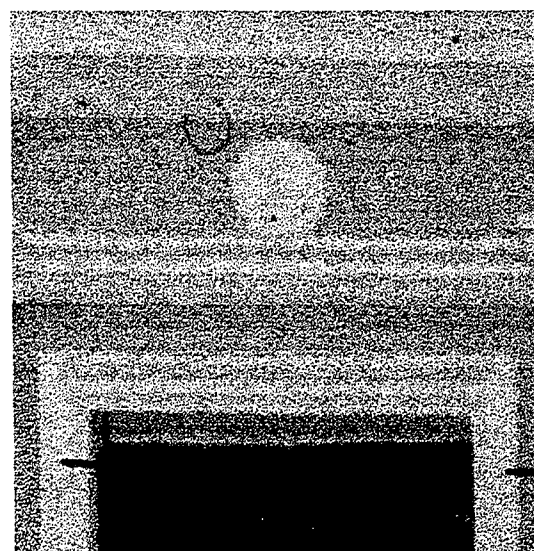
(A)



(B)



(C)



(D)

4.8 COMPARAÇÃO DOS PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS

Após a elaboração dos produtos fotogramétricos, cuja metodologia foi descrita ao longo deste capítulo, foram realizadas análises para comparar a precisão alcançada em cada um deles.

A comparação dos produtos foi realizada através da medição de coordenadas de pontos distribuídos em toda a fachada, contemplando diferentes profundidades. Foram escolhidos 28 pontos, denominados de pontos de comparação, assim distribuídos: 8 pontos no plano principal da fachada (correspondendo a uma profundidade de 3 metros); 8 pontos em um segundo plano, distante 6 cm do plano principal; 8 pontos cuja profundidade equivale a 3,10 metros; e um quarto plano cuja distância ao principal corresponde a 72 cm.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos em cada uma das etapas desta pesquisa são mostrados e analisados neste capítulo. Antes da análise dos produtos fotogramétricos, objetivo principal desta pesquisa, foram analisados diferentes equipamentos topográficos e métodos de cálculo, na determinação de coordenadas de pontos de apoio. Diferentes modelos matemáticos utilizados na correção do trabalho do filme também foram analisados. Os produtos fotogramétricos foram avaliados comparando coordenadas de pontos selecionados, obtidas em cada um dos produtos, com as correspondentes coordenadas determinadas topograficamente, consideradas como isentas de erros.

5.1 COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO

As coordenadas dos pontos de apoio foram obtidas a partir do método topográfico denominado de interseção à vante, que constitui de medições angulares horizontais e zenitais a partir de estações de observação, cujas coordenadas sejam conhecidas. O levantamento de campo foi realizado em duas etapas, com o objetivo de avaliar equipamentos de diferentes precisões angulares: na primeira, os ângulos foram obtidos com uma estação total (precisão de 1"); na segunda, foi utilizado um teodolito eletrônico (precisão de 10").

O cálculo das coordenadas foi processado por dois métodos distintos: interseção plana; e interseção espacial. A diferença entre estes dois métodos reside no fato de um considerar as retas definidoras das direções observadas como concorrentes (interseção plana) e o outro, considerar tais retas como reversas (interseção espacial).

As tabelas 3 e 4 mostram as coordenadas dos pontos de apoio calculadas pelo método de interseção plana, com as observações realizadas através da estação total e através do teodolito eletrônico, respectivamente.

TABELA 3 - COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO PLANA – ESTAÇÃO TOTAL

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	4,382	11,787	3,051
2	9,29	11,776	2,958
3	12,138	10,782	2,938
4	1,463	10,794	3,142
5	4,295	9,844	3,78
6	9,404	9,827	3,675
7	11,606	7,552	2,899
8	6,066	7,549	3,006
9	1,425	7,722	3,154
10	3,159	4,293	3,137
11	8,985	4,289	2,994
12	7,612	5,782	3,003

TABELA 4 - COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO PLANA – TEODOLITO ELETRÔNICO

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	4,384	11,789	3,053
2	9,286	11,772	2,964
3	12,130	10,779	2,940
4	1,475	10,793	3,137
5	4,299	9,845	3,786
6	9,400	9,827	3,681
7	11,598	7,556	2,906
8	6,067	7,549	3,007
9	1,430	7,719	3,152
10	3,160	4,298	3,116
11	8,986	4,295	2,995
12	7,610	5,778	2,998

As tabelas 5 e 6 mostram as coordenadas calculadas pelo método de interseção espacial, para observações realizadas com a estação total e com o teodolito eletrônico, respectivamente.

TABELA 5 - COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO ESPACIAL – ESTAÇÃO TOTAL

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	4,382	11,788	3,049
2	9,290	11,777	2,955
3	12,139	10,783	2,936
4	1,462	10,794	3,141
5	4,295	9,845	3,778
6	9,404	9,828	3,673
7	11,607	7,553	2,896
8	6,066	7,549	3,003
9	1,425	7,723	3,151
10	3,158	4,293	3,134
11	8,985	4,289	2,991
12	7,613	5,782	3,000

TABELA 6 - COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO ESPACIAL – TEODOLITO ELETRÔNICO

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	4,384	11,790	3,050
2	9,286	11,773	2,961
3	12,130	10,780	2,938
4	1,475	10,794	3,134
5	4,299	9,846	3,784
6	9,400	9,828	3,678
7	11,598	7,557	2,903
8	6,068	7,549	3,005
9	1,430	7,719	3,150
10	3,160	4,299	3,114
11	8,987	4,296	2,993
12	7,610	5,778	2,995

5.1.1 Análise dos Métodos de Cálculo

A análise dos métodos de cálculo apresentados nesta pesquisa foi realizada através das discrepâncias encontradas entre coordenadas dos pontos de apoio calculadas pelos dois métodos: interseção plana e interseção espacial. Na tabela 7 são mostradas as discrepâncias entre as coordenadas obtidas das observações realizadas com a estação total e na tabela 8 as discrepâncias entre as coordenadas obtidas de observações realizadas com o teodolito eletrônico.

TABELA 7 - DISCREPÂNCIAS ENTRE COORDENADAS CALCULADAS POR INTERSEÇÃO PLANA E INTERSEÇÃO ESPACIAL – ESTAÇÃO TOTAL

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0,000	-0,002	-0,001
2	0,000	-0,003	-0,001
3	-0,001	-0,002	-0,001
4	0,001	-0,001	0,000
5	0,000	-0,002	-0,001
6	0,000	-0,002	-0,001
7	-0,001	-0,003	-0,001
8	0,000	-0,003	0,000
9	0,000	-0,003	-0,001
10	0,001	-0,003	0,000
11	0,000	-0,003	0,000
12	-0,001	-0,003	0,000
Média	-0,0001	-0,0025	-0,0006
Desvio Padrão	0,0007	0,0007	0,0005

TABELA 8 - DISCREPÂNCIAS ENTRE COORDENADAS CALCULADAS POR INTERSEÇÃO PLANA E INTERSEÇÃO ESPACIAL – TEODOLITO ELETRÔNICO

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0,000	-0,003	-0,001
2	0,000	-0,003	-0,001
3	0,000	-0,002	-0,001
4	0,000	-0,003	-0,001
5	0,000	-0,002	-0,001
6	0,000	-0,003	-0,001
7	0,000	-0,003	-0,001
8	-0,001	-0,002	0,000
9	0,000	-0,002	0,000
10	0,000	-0,002	-0,001
11	-0,001	-0,002	-0,001
12	0,000	-0,003	0,000
Média	-0,0002	-0,0025	-0,0008
Desvio Padrão	0,0004	0,0005	0,0005

Das tabelas 7 e 8, observa-se que as discrepâncias encontradas nas coordenadas X e Z são todas inferiores a 1 mm. Para as coordenadas Y, que correspondem à profundidade das feições arquitetônicas, as discrepâncias se mostraram maiores, variando em média 2,5 mm, todas no mesmo sentido, independente do instrumento utilizado.

As diferenças relativas observadas nas tabelas 7 e 8 não são consideradas significativas para os grupos de levantamentos fotogramétricos classificados pelo ICOMOS como rápidos (ou relativamente simples) e precisos, cujos erros máximos permitidos na determinação de pontos correspondem a 5 cm e 2 cm, respectivamente, podendo concluir que os métodos de cálculo aplicados nesta pesquisa para determinar as coordenadas dos pontos de controle são equivalentes para as aplicações referentes a estes grupos.

5.1.2 Análise dos Equipamentos Topográficos

Assim como realizado na análise dos métodos de cálculo, os equipamentos topográficos utilizados neste trabalho foram analisados comparando as coordenadas calculadas dos pontos de apoio. A tabela 9 mostra as discrepâncias encontradas entre as coordenadas obtidas a partir de observações realizadas com os dois equipamentos: estação total e teodolito eletrônico, calculadas pelo método de interseção plana. A tabela 10 corresponde às discrepâncias entre as coordenadas obtidas através das observações realizadas pelos dois equipamentos, com coordenadas calculadas pelo método de interseção espacial.

TABELA 9 - DISCREPÂNCIAS ENTRE COORDENADAS CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO PLANA PARA OBSERVAÇÕES REALIZADAS A PARTIR DA ESTAÇÃO TOTAL E DO TEODOLITO ELETRÔNICO

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	-0,002	0,002	-0,002
2	0,004	0,006	0,004
3	0,008	0,002	0,003
4	-0,012	-0,005	0,001
5	-0,004	0,006	-0,001
6	0,004	0,006	0,000
7	0,008	0,007	-0,004
8	-0,001	0,001	0,000
9	-0,005	-0,002	0,003
10	-0,001	-0,021	-0,005
11	-0,001	0,001	-0,006
12	0,002	-0,005	0,004
Média	0,004	0,005	0,003
Desvio Padrão	0,003	0,005	0,002

TABELA 10 - DISCREPÂNCIAS ENTRE COORDENADAS CALCULADAS PELO MÉTODO DE INTERSEÇÃO ESPACIAL PARA OBSERVAÇÕES REALIZADAS A PARTIR DA ESTAÇÃO TOTAL E DO TEODOLITO ELETRÔNICO

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	-0,002	0,001	-0,002
2	0,004	0,006	0,004
3	0,009	0,002	0,003
4	-0,013	-0,007	0,000
5	-0,004	0,006	-0,001
6	0,004	0,005	0,000
7	0,009	0,007	-0,004
8	-0,002	0,002	0,000
9	-0,005	-0,001	0,004
10	-0,002	-0,020	-0,006
11	-0,002	0,002	-0,007
12	0,003	-0,005	0,004
Média	0,005	0,005	0,003
Desvio Padrão	0,004	0,005	0,002

Observa-se nas tabelas 9 e 10 que independente do método de cálculo utilizado, as coordenadas calculadas a partir de observações realizadas pela estação total e pelo teodolito eletrônico, apresentaram discrepância máxima de 20 mm (ponto 10). Feições “naturais” da fachada (cantos de portas e detalhes arquitetônicos) foram utilizadas como pontos de apoio. Estas feições não são perfeitamente definidas como pontos pré-sinalizados, permitindo diferenças nas observações angulares realizadas em levantamentos topográficos distintos, devido a erros de pontaria.

As coordenadas variaram em média 4 mm, com desvio padrão médio de 4 mm, independente do método utilizado no cálculo. Os pontos 4 e 10 apresentaram

as maiores discrepâncias (acima de 1 cm) caracterizando possíveis erros grosseiros. O resultado encontrado permite considerar os dois equipamentos com precisão equivalente para determinar coordenadas do espaço objeto, para as finalidades dos dois primeiros grupos de levantamentos arquitetônicos classificados pelo ICOMOS: rápidos (ou relativamente simples) e precisos.

5.2 ANÁLISE DA FOTOTRIANGULAÇÃO

A fototriangulação foi processada com o objetivo de determinar os parâmetros de calibração da câmera, como também as coordenadas das estações de exposição e os ângulos eulerianos da câmera no momento de cada exposição. Além destas informações foram obtidas as coordenadas ajustadas dos pontos de apoio e fotogramétricos, no referencial do espaço objeto. Estas coordenadas permitiram analisar os modelos matemáticos utilizados na correção do trabalho do filme.

5.2.1 Parâmetros de Calibração da Câmera

Os dados mostrados a seguir (tabela 11) foram obtidos do processamento da fototriangulação com auto calibração a partir de fotocoordenadas corrigidas do trabalho do filme por transformação isogonal, tendo como referência na modelação dos parâmetros as quatro marcas do *reseau* mais próximas aos pontos.

TABELA 11 - PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DA CÂMERA

Distância Focal (f)		50,8901 mm
Coordenadas do Ponto Principal	x_0	-0,2162 mm
	y_0	-0,1823 mm
Distorção Radial Simétrica	k_1	-2,3583 E-5 mm ⁻²
	k_2	2,6856 E-9 mm ⁻⁴
	k_3	5,4339 E-12 mm ⁻⁶
Distorção Descentrada	P_1	-1,1752 E-5 mm ⁻²
	P_2	-1.3020 E-5 mm ⁻²

5.2.2 Resultados do Processamento da Fototriangulação

Conforme descrito em 4.6, a fototriangulação foi processada três vezes, em cada um dos processamentos foram utilizadas coordenadas fiduciais obtidas por diferentes transformações matemáticas (transformação isogonal e afim geral) e diferentes referências na modelação parâmetros das transformações (marcas do *reseau* mais próximas aos pontos considerados e marcas principais do *reseau*).

As tabelas a seguir mostram os resultados obtidos da fototriangulação utilizando coordenadas fiduciais obtidas através de uma transformação isogonal, tendo as quatro marcas do *reseau*, mais próximas aos pontos considerados, como referência na modelagem dos parâmetros. O processamento obteve variância da unidade de peso a posteriori $\hat{\sigma}_0^2 = 0,9035$. A tabela 12 mostra as coordenadas referentes às estações de exposição e suas orientações (ângulos de Euler) e a tabela 13 mostra os desvios padrão médios dos resíduos encontrados nas fotocoordenadas ajustadas.

TABELA 12 - COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E ÂNGULOS DE EULER – TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL (MARCAS DO RESEAU)

Fotografia	x (m)	y (m)	z (m)	ω (°)	φ (°)	κ (°)
1	1,901	4,893	13,294	15,58969	334,99104	8,33347
2	6,859	4,646	13,252	17,57026	0,83531	-0,60700
3	6,951	4,546	13,241	19,18743	1,66913	267,91303
4	11,742	4,394	13,092	18,58495	24,60597	-6,81509

**TABELA 13 - DESVIO PADRÃO MÉDIO DOS RESÍDUOS DAS
FOTOCOORDENADAS – TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL**

Desvio	Foto 1(mm)	Foto 2 (mm)	Foto 3 (mm)	Foto 4 (mm)	Média (mm)
σ_X	0,0083	0,0097	0,0095	0,0076	0,0088
σ_Y	0,0116	0,0067	0,0097	0,0098	0,0095

A tabela 14 corresponde às coordenadas ajustadas dos pontos de controle e fotogramétricos, no referencial do espaço objeto e a tabela 15 mostra os resíduos encontrados nos pontos de apoio, com seus respectivos desvios padrão médios.

**TABELA 14 - COORDENADAS AJUSTADAS DOS PONTOS DE APOIO E
FOTOGRAFÉTRICOS NO REFERENCIAL DO ESPAÇO OBJETO –
TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL**

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
101	4,381	11,790	3,051
102	9,291	11,787	2,952
105	4,298	9,842	3,779
107	11,592	7,547	2,899
108	6,071	7,546	3,000
201	10,167	12,721	3,132
202	3,503	12,749	3,254
203	6,714	13,442	2,948
204	6,986	13,454	2,927
205	5,392	11,781	3,028
207	7,336	11,780	2,996
208	8,265	11,783	2,971
209	5,284	9,991	3,768
210	3,753	9,384	3,795
212	12,131	9,084	2,878
213	1,508	9,084	3,107
214	7,627	7,556	2,961
215	12,134	7,547	2,875
216	6,286	5,366	2,983
218	6,284	4,895	2,980
219	10,258	5,365	2,912
220	11,390	4,895	2,900
222	8,269	5,366	2,941

**TABELA 15 - RESÍDUOS DOS PONTOS DE APOIO –
TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL**

Ponto	V_x	V_y	V_z
101	-0,0014	0,0019	0,0019
102	0,0006	0,0102	-0,0032
105	0,0033	-0,0032	0,0013
107	-0,0078	-0,0056	0,0034
108	0,0053	-0,0032	-0,0035
σ	0,0051 m	0,0063 m	0,0031 m

Nas tabelas 16, 17, 18 e 19 são mostrados os resultados obtidos do processamento da fototriangulação com coordenadas fiduciais corrigidas por transformação afim geral, utilizando as quatro marcas do *reseau* mais próximas aos pontos considerados. A variância da unidade de peso a posteriori encontrada no processamento foi de $\hat{\sigma}_0^2 = 0,8977$.

**TABELA 16 - COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E ÂNGULOS DE
EULER – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (MARCAS DO RESEAU)**

Fotografia	x (m)	y (m)	z (m)	ω (°)	φ (°)	κ (°)
1	1,903	4,891	13,295	15,61035	335,03038	8,34082
2	6,859	4,644	13,250	17,59777	0,84744	-0,60259
3	6,953	4,546	13,241	19,20078	1,66398	267,91368
4	11,740	4,394	13,093	18,60187	24,60741	-6,81868

**TABELA 17 - DESVIO PADRÃO MÉDIO DOS RESÍDUOS DAS
FOTOCOORDENADAS – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL
(MARCAS DO RESEAU)**

Desvio	Foto 1(mm)	Foto 2 (mm)	Foto 3 (mm)	Foto 4 (mm)	Média (mm)
σ_x	0,0082	0,0095	0,0097	0,0075	0,0087
σ_y	0,0108	0,0071	0,0100	0,0096	0,0094

TABELA 18 - COORDENADAS AJUSTADAS DOS PONTOS DE APOIO E FOTOGRAMÉTRICOS NO REFERENCIAL DO ESPAÇO OBJETO – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (MARCAS DO RESEAU)

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
101	4,380	11,790	3,051
102	9,291	11,788	2,952
105	4,298	9,842	3,780
107	11,592	7,547	2,900
108	6,072	7,545	2,999
201	7,412	5,363	2,957
202	10,167	12,720	3,133
203	3,503	12,749	3,254
204	6,716	13,444	2,949
205	5,392	11,782	3,027
207	7,336	11,781	2,995
208	8,265	11,784	2,971
209	5,284	9,991	3,766
210	3,753	9,384	3,795
212	12,130	9,084	2,877
213	1,508	9,083	3,107
214	7,627	7,556	2,961
215	12,133	7,548	2,874
216	6,287	5,365	2,984
218	6,284	4,894	2,980
219	10,258	5,366	2,912
220	11,389	4,895	2,897
222	8,269	5,366	2,941

TABELA 19 - RESÍDUOS DOS PONTOS DE CONTROLE – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (MARCAS DO RESEAU)

Ponto	V_x (m)	V_y (m)	V_z (m)
101	-0,0016	0,0021	0,0019
102	0,0010	0,0105	-0,0034
105	0,0034	-0,0034	0,0017
107	-0,0084	-0,0056	0,0037
108	0,0056	-0,0036	-0,0039
σ	0,0054 m	0,0065 m	0,0034 m

As tabelas 20, 21, 22 e 23 apresentam os resultados obtidos do processamento da fototriangulação com coordenadas fiduciais obtidas por transformação afim geral, utilizando as 4 marcas principais do *reseau* como referência na modelação dos parâmetros. A variância da unidade de peso a posteriori calculada foi de $\hat{\sigma}_0^2 = 1,3555$.

TABELA 20 - COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E ÂNGULOS DE EULER – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (4 MARCAS PRINCIPAIS)

Fotografia	x (m)	y (m)	z (m)	ω (°)	φ (°)	κ (°)
1	1,883	4,889	13,287	15,78860	334,89283	8,41391
2	6,863	4,644	13,253	17,73380	0,82412	-0,60680
3	6,961	4,514	13,229	19,33163	1,58565	267,87492
4	11,754	4,401	13,086	18,72156	24,62655	-6,90135

TABELA 21 - DESVIO PADRÃO MÉDIO DOS RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (4 MARCAS PRINCIPAIS)

Desvio	Foto 1(mm)	Foto 2 (mm)	Foto 3 (mm)	Foto 4 (mm)	Média (mm)
σ_X	0,0090	0,0099	0,0141	0,0074	0,0101
σ_Y	0,0121	0,0090	0,0148	0,0098	0,0114

TABELA 22 - COORDENADAS AJUSTADAS DOS PONTOS DE CONTROLE E FOTOGRAFAMÉTRICOS NO REFERENCIAL DO ESPAÇO OBJETO – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (4 MARCAS PRINCIPAIS)

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
101	4,382	11,789	3,053
102	9,289	11,791	2,950
105	4,300	9,841	3,779
107	11,592	7,545	2,901
108	6,070	7,547	2,998
201	7,408	5,365	2,955
202	10,168	12,727	3,129
203	3,505	12,751	3,255
204	6,714	13,445	2,955
205	5,392	11,780	3,029
207	7,334	11,781	2,995
208	8,263	11,785	2,970
209	5,283	9,991	3,763
210	3,753	9,385	3,791
212	12,133	9,083	2,881
213	1,510	9,084	3,109
214	7,623	7,557	2,960
215	12,134	7,544	2,879
216	6,285	5,368	2,980
218	6,283	4,898	2,977
219	10,254	5,365	2,908
220	11,386	4,892	2,897
222	8,264	5,367	2,939

TABELA 23 - RESÍDUOS DOS PONTOS DE CONTROLE – TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL (4 MARCAS PRINCIPAIS)

Ponto	V_x	V_y	V_z
101	-0,0004	0,0006	0,0036
102	0,0010	0,0139	-0,0050
105	0,0047	-0,0039	0,0013
107	-0,0076	-0,0083	0,0052
108	0,0043	-0,0023	-0,0051
σ	0,0050 m	0,0084 m	0,0048 m

5.2.3 Análise da Variância a Posteriori

A variância a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$) obtida de um ajustamento de observações deve ser comparada com o valor da variância a priori (σ_0^2), arbitrada inicialmente. Esta comparação indica possíveis problemas no ajustamento, sendo considerada um indicador de qualidade (GEMAEL, 1994). O valor da variância a posteriori deve ser igual ao valor da variância a priori, a um determinado nível de significância (probabilidade máxima admitida em rejeitar uma hipótese verdadeira). Para verificar a igualdade, se aplica um teste de hipótese baseado na distribuição qui-quadrado (χ^2), de modo a verificar se a discrepância entre os dois valores é significativa ao nível estabelecido.

Em todos os processamentos de fototriangulação realizados nesta pesquisa, arbitrou-se uma variância a priori unitária $\sigma_0^2 = 1$. A tabela 24 mostra os valores da variância a posteriori e os valores calculados do χ^2 obtidos nos processamentos de fototriangulação.

TABELA 24 - VARIÂNCIA A POSTERIORI E χ^2 OBTIDOS NA FOTOTRIANGULAÇÃO

Transformação Isogonal		$\hat{\sigma}_0^2 = 0,9035$	$\chi^2 = 85,83$
Transformação Afim Geral	4 marcas do <i>reseau</i>	$\hat{\sigma}_0^2 = 0,8977$	$\chi^2 = 85,28$
	4 marcas principais	$\hat{\sigma}_0^2 = 1,3555$	$\chi^2 = 128,77$

O processamento da fototriangulação apresentou 95 graus de liberdade com intervalo de aceitação $\chi^2_{\frac{\alpha}{2}} = 69,48$ a $\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}} = 123,37$, para um nível de significância $\alpha = 5\%$. De acordo com GEMAEL (1994), o nível de significância usualmente utilizado em ajustamento de observações é de 5% ou 10%.

Nos processamentos, com coordenadas fiduciais obtidas utilizando as quatro marcas do *reseau* mais próximas aos pontos na modelação dos parâmetros das transformações, os valores de χ^2 calculados pertencem ao intervalo de aceitação portanto, a hipótese da variância a posteriori ser igual a variância a priori ($\hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2$) não é rejeitada ao nível de significância de 5%. Se calcularmos o intervalo de aceitação para $\alpha = 10\%$, encontramos $\chi^2_{\frac{\alpha}{2}} = 73,52$ a $\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}} = 118,80$, podendo afirmar que a hipótese também não é rejeitada ao nível de significância de 10%.

O valor do χ^2 calculado na fototriangulação, com coordenadas fiduciais obtidas por transformação afim geral, utilizando as quatro marcas principais na determinação de seus parâmetros, não pertence ao intervalo de aceitação, sendo a hipótese $\hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2$ rejeitada ao nível de significância de 5%.

Os resultados encontrados nos testes de hipóteses, permitem concluir que as duas transformações matemáticas (afim geral e isogonal) utilizadas na correção do trabalho do filme oferecem o mesmo resultado. Quanto aos pontos de referência (4 marcas do *reseau* e 4 marcas principais) utilizados na determinação dos parâmetros das transformações, os processamentos envolvendo fotocoordenadas corrigidas do trabalho do filme, utilizando as quatro marcas do *reseau* mais próximas

aos pontos considerados, obtiveram melhor resultado do que o processamento com fotocoordenadas corrigidas utilizando as quatro marcas principais.

5.2.4 Análise dos Transformações utilizadas na Correção do Trabalho do Filme

A tabela 25 mostra as diferenças relativas entre os valores das coordenadas ajustadas das estações de exposição e ângulos de Euler obtidos por transformação isogonal e afim geral, ambas no plano. Observa-se discrepâncias da ordem de 2 mm para as coordenadas das estações de exposição e variação máxima nos ângulos eulerianos de 2,36'.

TABELA 25 - DIFERENÇAS RELATIVAS ENTRE COORDENADAS AJUSTADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E ÂNGULOS DE EULER OBTIDOS POR TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL E AFIM GERAL NO PLANO

Fotografia	x (m)	y (m)	z (m)	ω (')	ϕ (')	κ (')
1	-0,002	0,002	-0,001	-1,2	-2,4	-0,4
2	0,000	0,002	0,002	-1,6	-0,7	-0,3
3	-0,002	0,000	0,000	-0,8	0,3	0,0
4	0,002	0,000	-0,001	-1,0	-0,1	0,2

Analisando as tabelas 13 e 17, que correspondem ao desvio padrão médio dos resíduos das fotocoordenadas em cada uma das fotografias, obtidos dos processamentos da fototriangulação realizados para coordenadas obtidas por transformação isogonal e afim geral, verificou-se que em ambas transformações o desvio médio correspondeu a aproximadamente 0,009 mm, ou seja, $\frac{3}{4}$ do valor do *pixel*, que é de 0,012 mm. A tabela 26 mostra os desvios padrão médios dos resíduos das fotocoordenadas, obtidas por transformação isogonal e afim geral,

ambas utilizando as quatro marcas do *reseau* mais próximas aos pontos, na modelagem dos parâmetros.

**TABELA 26 - DESVIOS PADRÃO MÉDIOS DOS RESÍDUOS DAS
FOTOCOORDENADAS**

Transformação	σ_X (mm)	σ_Y (mm)	Média (mm)	Média (pixel)
Isogonal	0,009	0,009	0,009	$\frac{3}{4}$
Afim Geral	0,009	0,009	0,009	$\frac{3}{4}$

Um dos objetivos da fototriangulação, conforme visto em 3.6, é densificar os pontos de controle do espaço objeto, através de observações destes pontos no referencial fotogramétrico. As coordenadas observadas no referencial instrumental são transformadas matematicamente para o referencial fiducial, sendo no instante desta transformação corrigidas quanto ao trabalho do filme. A tabela 27 apresenta as diferenças relativas encontradas nas coordenadas dos pontos obtidos por fototriangulação utilizando observações corrigidas por transformação isogonal e afin geral.

**TABELA 27 - DIFERENÇAS RELATIVAS ENTRE COORDENADAS DO ESPAÇO
OBJETO AJUSTADAS UTILIZANDO OBSERVAÇÕES CORRIGIDAS DO
TRABALHO DO FILME POR TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL E AFIM GERAL**

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
101	0,001	0,000	0,000
102	0,000	0,000	0,000
105	0,000	0,000	-0,001
107	0,000	0,000	-0,001
108	-0,001	0,001	0,001
201	-0,001	0,001	0,000
202	0,000	0,001	-0,001
203	0,000	0,000	0,000
204	-0,002	-0,002	-0,001
205	0,000	-0,001	0,001
207	0,000	-0,001	0,001
208	0,000	-0,001	0,000
209	0,000	0,000	0,002
210	0,000	0,000	0,000
212	0,001	0,000	0,001
213	0,000	0,001	0,000
214	0,000	0,000	0,000
215	0,001	-0,001	0,001
216	-0,001	0,001	-0,001
218	0,000	0,001	0,000
219	0,000	-0,001	0,000
220	0,001	0,000	0,003
222	0,000	0,000	0,000
Média	0,0004	0,0006	0,0007
Desvio Padrão	0,0006	0,0006	0,0008

Analisando a tabela 27 se verifica que as diferenças entre as coordenadas obtidas da fototriangulação com dados observados corrigidos por transformação isogonal e afim geral, ambas utilizando as 4 marcas do *reseau*, como referência na determinação dos parâmetros, variaram em média 0,5 mm, com desvio padrão médio de 0,7 mm.

5.2.5 Análise dos Pontos de Referência utilizados na determinação dos Parâmetros das Transformações

A tabela 28 mostra as diferenças relativas entre os valores das coordenadas ajustadas das estações de exposição e ângulos de Euler obtidos por transformação afim geral utilizando as quatro marcas principais e as quatro marcas do *reseau*, na determinação dos parâmetros modeladores.

TABELA 28 - DIFERENÇAS RELATIVAS ENTRE COORDENADAS AJUSTADAS DAS ESTAÇÕES DE EXPOSIÇÃO E ÂNGULOS DE EULER OBTIDOS POR TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL E AFIM GERAL NO PLANO

Fotografia	x (m)	y (m)	z (m)	ω (')	ϕ (')	κ (')
1	0,020	0,002	0,008	10,7	8,3	-4,4
2	-0,004	0,000	-0,003	-8,2	1,4	0,3
3	-0,008	0,032	0,012	-7,9	4,7	2,3
4	-0,14	-0,007	0,007	-7,2	-1,2	5,0

Verifica-se da tabela acima que as coordenadas das estações de exposição tiveram um deslocamento de até 3,2 cm e que a variação encontrada nos ângulos eulerianos chegou a mais de 10".

A tabela 29 mostra os desvios padrão médios das fotocoordenadas ajustadas nos processamentos da fototriangulação com dados obtidos por transformação afim geral, utilizando as quatro marcas do *reseau* e as quatro marcas principais na determinação dos parâmetros modeladores.

TABELA 29 - DESVIOS PADRÃO MÉDIOS DOS RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS

Pontos de Referência	σ_X (mm)	σ_Y (mm)	Média (mm)	Média (<i>pixel</i>)
4 marcas do <i>reseau</i>	0,009	0,009	0,009	$\frac{3}{4}$
4 marcas principais	0,010	0,011	0,011	~ 1

Da tabela acima, se observa um desvio padrão médio de 0,009 mm (ou $\frac{3}{4}$ do *pixel*) para os resíduos das fotocoordenadas obtidas da fototriangulação com coordenadas corrigidas do trabalho do filme por transformação afim geral utilizando as quatro marcas do *reseau* na determinação de seus parâmetros modeladores. O desvio padrão médio dos resíduos das fotocoordenadas obtidas da fototriangulação com coordenadas corrigidas por transformação afim geral utilizando as quatro marcas principais ficou em 0,011 mm, ou aproximadamente um *pixel*.

A tabela 30, mostrada a seguir, mostra as diferenças encontradas nas coordenadas dos pontos, no espaço objeto, obtidas através de observações no referencial instrumental, corrigidas do trabalho do filme por transformação afim geral, utilizando as quatro marcas do *reseau* e as quatro marcas principais na determinação dos parâmetros modeladores.

**TABELA 30 - DIFERENÇAS RELATIVAS ENTRE COORDENADAS DO ESPAÇO
OBJETO AJUSTADAS UTILIZANDO OBSERVAÇÕES CORRIGIDAS DO
TRABALHO DO FILME UTILIZANDO AS 4 MARCAS DO RESEAU
E AS 4 MARCAS PRINCIPAIS**

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
101	-0,001	0,002	-0,002
102	0,002	-0,003	0,002
105	-0,001	0,000	0,000
107	-0,001	0,003	-0,001
108	0,001	-0,001	0,001
201	0,004	-0,002	0,003
202	-0,001	-0,007	0,003
203	-0,002	-0,002	-0,001
204	0,002	-0,001	-0,006
205	0,000	0,002	-0,001
207	0,002	0,000	0,000
208	0,002	-0,002	0,000
209	0,000	0,000	0,003
210	0,000	-0,001	0,004
212	-0,002	0,001	-0,003
213	-0,002	-0,001	-0,002
214	0,004	-0,001	0,001
215	-0,001	0,004	-0,005
216	0,002	-0,002	0,003
218	0,002	-0,004	0,003
219	0,004	0,001	0,004
220	0,003	0,003	0,000
222	0,005	-0,001	0,003
Média	0,0019	0,0019	0,0022
Desvio Padrão	0,0013	0,0016	0,0017

Da tabela 30 verifica-se que as diferenças entre as coordenadas obtidas da fototriangulação com dados observados corrigidos por transformação afim geral, utilizando as 4 marcas do *reseau* e as 4 marcas principais, como referência na determinação dos parâmetros, variaram em média 2 mm, com desvio padrão médio de 1,6 mm.

5.3 COORDENADAS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO

Conforme apresentado em 4.8, a precisão alcançada em cada um dos produtos fotogramétricos elaborados nesta pesquisa, foi analisada através das coordenadas dos pontos de comparação. Estes pontos de comparação foram selecionados, contemplando feições de diferentes profundidades e distribuídos em toda a extensão da fachada. Utilizou-se como parâmetros de comparação as coordenadas destes pontos obtidas por Topografia, sendo consideradas, neste trabalho, como isentas de erros.

A tabela 31 mostra as coordenadas dos pontos de comparação obtidas por levantamento topográfico. As tabelas 32, 33 e 34 mostram as coordenadas destes pontos obtidas, respectivamente, por estereorestituição, monorestituição e fotografia retificada. Não foram determinadas as coordenadas na ortofoto digital por se apresentar distorcida.

**TABELA 31 - COORDENADAS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO
(LEVANTAMENTO TOPOGÁFICO)**

Ponto/Plano	X (m)	Y (m)	Z (m)
1-1	6,329	11,776	3,002
2-1	7,333	11,770	2,991
3-1	9,290	11,777	2,955
4-1	2,058	7,553	3,102
5-1	6,066	7,561	2,979
6-1	7,624	7,600	2,967
7-1	11,413	5,366	2,852
8-1	8,269	5,368	2,934
1-2	1,914	7,714	3,165
2-2	3,783	7,716	3,125
3-2	5,928	7,718	3,045
4-2	7,779	7,719	3,019
5-2	9,891	7,722	2,976
6-2	11,773	7,725	3,189
7-2	1,428	9,251	3,198
8-2	12,153	9,265	2,941
1-3	4,146	11,687	3,103
2-3	4,145	11,170	3,103
3-3	5,632	11,679	3,081
4-3	6,078	11,167	3,075
5-3	8,029	11,646	3,031
6-3	7,591	10,899	3,054
7-3	9,508	11,695	3,003
8-3	9,928	10,908	2,998
1-4	3,707	10,166	3,783
2-4	3,704	9,224	3,776
3-4	9,944	9,230	3,671
4-4	9,948	10,172	3,668

**TABELA 32 - COORDENADAS DE PONTOS DA FACHADA OBTIDAS POR
ESTEREORESTITUIÇÃO**

Ponto/Plano	X (m)	Y (m)
1-1	6,330	11,776
2-1	7,335	11,771
3-1	9,290	11,782
4-1	2,065	7,552
5-1	6,070	7,557
6-1	7,628	7,557
7-1	11,412	5,370
8-1	8,273	5,370
1-2	1,921	7,709
2-2	3,787	7,723
3-2	5,924	7,714
4-2	7,784	7,715
5-2	9,896	7,715
6-2	11,775	7,726
7-2	1,431	9,250
8-2	12,154	9,266
1-3	4,146	11,685
2-3	4,146	11,169
3-3	5,630	11,682
4-3	6,078	11,169
5-3	8,030	11,649
6-3	7,593	10,903
7-3	9,508	11,694
8-3	9,953	10,903
1-4	3,705	10,167
2-4	3,704	9,224
3-4	9,950	9,231
4-4	9,951	10,172

**TABELA 33 - COORDENADAS DE PONTOS DA FACHADA OBTIDAS POR
MONORESTITUIÇÃO**

Ponto/Plano	X (m)	Y (m)
1-1	6,330	11,780
2-1	7,340	11,780
3-1	9,290	11,790
4-1	2,070	7,550
5-1	6,070	7,564
6-1	7,620	7,560
7-1	11,410	5,370
8-1	8,270	5,380
1-2	1,920	7,710
2-2	3,790	7,740
3-2	5,930	7,710
4-2	7,780	7,720
5-2	9,900	7,720
6-2	11,770	7,720
7-2	1,430	9,250
8-2	12,160	9,270
1-3	4,150	11,680
2-3	4,140	11,180
3-3	5,640	11,670
4-3	6,080	11,160
5-3	8,030	11,650
6-3	7,590	10,900
7-3	9,510	11,700
8-3	9,930	10,910
1-4	3,710	10,170
2-4	3,700	9,220
3-4	9,950	9,230
4-4	9,950	10,170

**TABELA 34 - COORDENADAS DE PONTOS DA FACHADA OBTIDAS A PARTIR
DA FOTOGRAFIA RETIFICADA**

Ponto / Plano	X (m)	Y (m)
1-1	6,330	11,780
2-1	7,340	11,780
3-1	9,290	11,790
4-1	2,060	7,550
5-1	6,070	7,560
6-1	7,630	7,570
7-1	11,420	5,370
8-1	8,280	5,380
2-1	1,880	7,730
2-2	3,750	7,785
3-2	5,910	7,740
4-2	7,780	7,750
5-2	9,920	7,750
6-2	11,790	7,740
7-2	1,410	9,280
8-2	12,170	9,290
1-3	4,130	11,700
2-3	4,120	11,190
3-3	5,630	11,730
4-3	6,070	11,180
5-3	8,030	11,710
6-3	7,600	10,920
7-3	9,530	11,750
8-3	9,980	10,960
1-4	3,490	10,660
2-4	3,490	9,600
3-4	10,210	9,610
4-4	10,230	10,650

5.3.1 Análise da Estereorestituição

A tabela 35, mostrada a seguir, mostra as diferenças encontradas nas coordenadas dos pontos de comparação, referentes ao espaço objeto, obtidas por observações na estereorestituição com as determinadas topograficamente. A tabela 36 mostra o quanto os pontos se desviaram dos obtidos topograficamente.

TABELA 35 - DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDAS POR ESTEREORESTITUIÇÃO

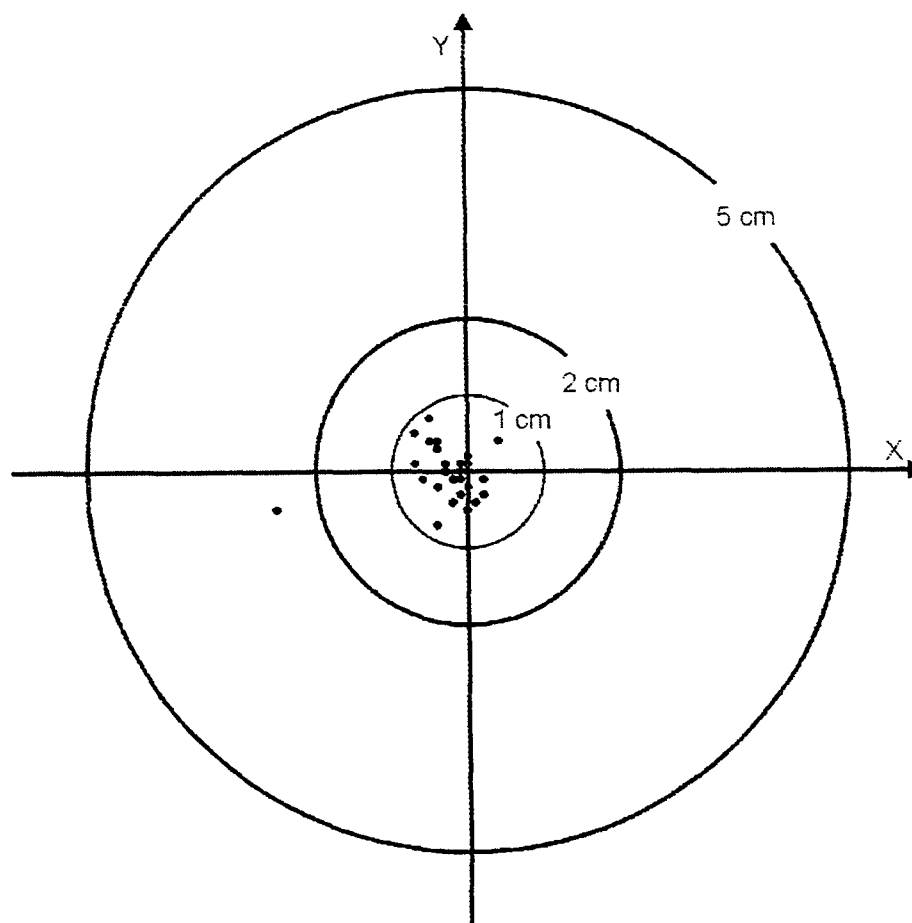
Ponto/Plano	X (m)	Y (m)
1-1	-0,001	0,000
2-1	-0,002	-0,001
3-1	0,000	-0,005
4-1	-0,007	0,001
5-1	-0,004	0,004
6-1	-0,004	0,003
7-1	0,001	-0,004
8-1	-0,004	-0,002
1-2	-0,007	0,005
2-2	-0,004	-0,007
3-2	0,004	0,004
4-2	-0,005	0,004
5-2	-0,005	0,007
6-2	-0,002	-0,001
7-2	-0,003	0,001
8-2	-0,001	-0,001
1-3	0,000	0,002
2-3	-0,001	0,001
3-3	0,002	-0,003
4-3	0,000	-0,002
5-3	-0,001	-0,003
6-3	-0,002	-0,004
7-3	0,000	0,001
8-3	-0,025	0,005
1-4	0,002	-0,001
2-4	0,000	0,000
3-4	-0,006	-0,001
4-4	-0,003	0,000

TABELA 36 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDOS POR ESTEREORESTITUIÇÃO

Ponto/Plano	Desvio (cm)
1-1	0,1
2-1	0,2
3-1	0,5
4-1	0,7
5-1	0,6
6-1	0,5
7-1	0,4
8-1	0,4
1-2	0,9
2-2	0,8
3-2	0,6
4-2	0,6
5-2	0,9
6-2	0,2
7-2	0,3
8-2	0,1
1-3	0,2
2-3	0,1
3-3	0,4
4-3	0,2
5-3	0,3
6-3	0,4
7-3	0,1
8-3	2,5
1-4	0,2
2-4	0,0
3-4	0,6
4-4	0,3
Média	0,5
Desvio Padrão	0,5

A figura 32 representa graficamente as diferenças obtidas nas tabelas 35 e 36, mostrando o deslocamento de cada ponto obtido da estereorestituição, em relação aos determinados topograficamente. Verifica-se que os 28 pontos analisados estão internos à circunferência externa, que corresponde a um desvio de 5 cm, atendendo às especificações do ICOMOS para levantamentos rápidos e relativamente simples. Apenas um deles (ponto 8-3, com desvio de 2,5 cm) não atende ao estabelecido para levantamentos precisos, que pressupõe desvio máximo de 2 cm. Observa-se que a maioria dos pontos se concentraram internamente ao círculo que corresponde a um desvio de 1 cm, sendo o desvio médio de 0,5 cm, podendo afirmar que a precisão encontrada foi superior a 1 cm.

FIGURA 32 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDOS NA ESTEREORESTITUIÇÃO



5.3.2 Análise da Monorestituição

A tabela 37 mostra as diferenças encontradas nas coordenadas dos pontos de comparação, referentes ao espaço objeto, obtidas por observações realizadas no produto obtido por monorestituição com as determinadas topograficamente. A tabela 38 mostra os desvios entre os pontos obtidos por monorestituição e os obtidos topograficamente.

TABELA 37 - DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDAS POR MONORESTITUIÇÃO

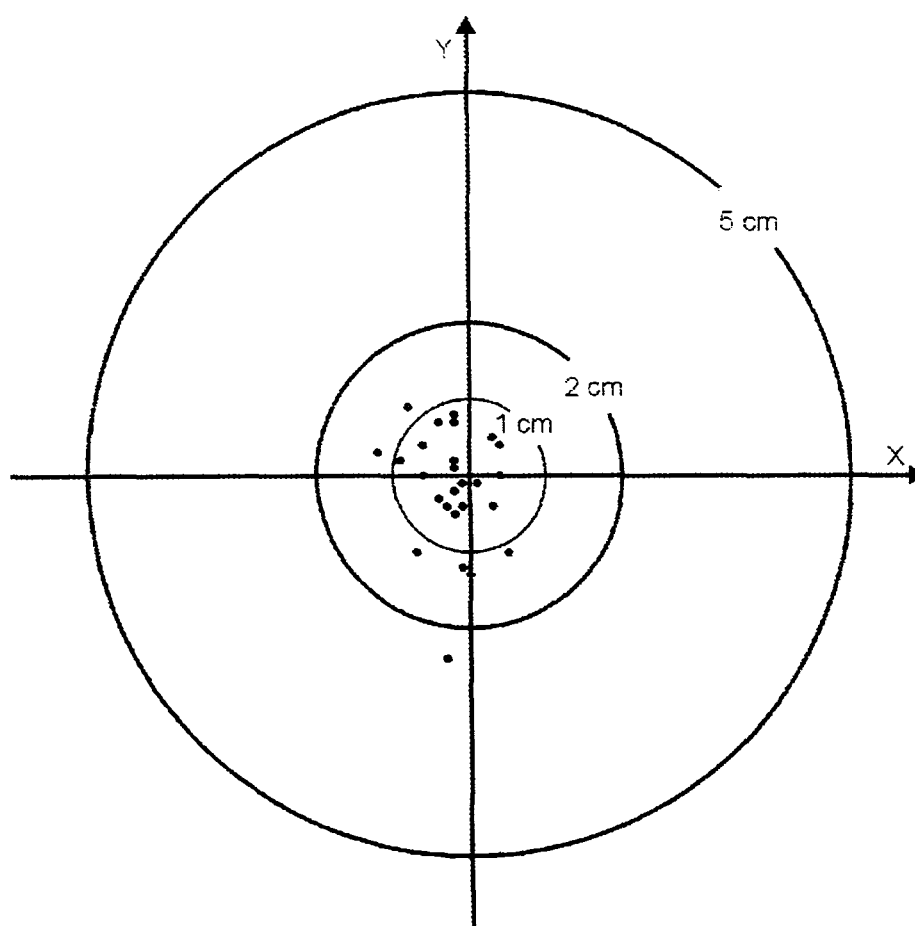
Ponto/Plano	X (m)	Y (m)
1-1	-0,001	-0,004
2-1	-0,007	-0,010
3-1	0,000	-0,013
4-1	-0,012	0,003
5-1	-0,004	-0,003
6-1	0,004	0,000
7-1	0,003	-0,004
8-1	-0,001	-0,012
1-2	-0,006	0,004
2-2	-0,007	-0,024
3-2	-0,002	0,008
4-2	-0,001	-0,001
5-2	-0,009	0,002
6-2	0,003	0,005
7-2	-0,002	0,001
8-2	-0,007	-0,005
1-3	-0,004	0,007
2-3	0,005	-0,010
3-3	-0,008	0,009
4-3	-0,002	0,007
5-3	-0,001	-0,004
6-3	0,001	-0,001
7-3	-0,002	-0,005
8-3	-0,002	-0,002
1-4	-0,003	-0,004
2-4	0,004	0,004
3-4	-0,006	0,000
4-4	-0,002	0,002

TABELA 38 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDOS POR MONORESTITUIÇÃO

Ponto/Plano	Desvio (cm)
1-1	0,4
2-1	1,2
3-1	1,3
4-1	1,2
5-1	0,5
6-1	0,4
7-1	0,5
8-1	1,2
1-2	0,7
2-2	2,5
3-2	0,8
4-2	0,1
5-2	0,9
6-2	0,6
7-2	0,2
8-2	0,9
1-3	0,8
2-3	1,1
3-3	1,2
4-3	0,7
5-3	0,4
6-3	0,1
7-3	0,5
8-3	0,3
1-4	0,5
2-4	0,6
3-4	0,6
4-4	0,3
Média	0,7
Desvio Padrão	0,5

Assim como realizado na análise do produto da estereorestituição, os desvios encontrados entre as coordenadas dos pontos de comparação obtidas topograficamente, com as obtidas da monorestituição (tabelas 37 e 38) foram representados graficamente, conforme figura 33. Todos os pontos analisados pertencem ao círculo externo, apresentando desvio inferior a 5 cm (grupo de levantamentos rápidos ou relativamente simples). Apenas um ponto (ponto 2-2, com desvio de 2,5 cm) não pertence ao círculo correspondente ao grupo de levantamentos precisos (desvio inferior a 2 cm).

FIGURA 33 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDOS NA MONORESTITUIÇÃO



Analisando as tabelas 36 e 38, juntamente com as figuras 32 e 33, se verifica que os desvios obtidos nas coordenadas dos pontos de comparação na estereorestituição (média de 0,5 cm com desvio padrão de 0,5 cm) se apresentaram mais homogêneos do que os obtidos na monorestituição (média de 0,7 cm com desvio padrão de 0,5 cm), porém ambos produtos (obtidos por monorestituição e estereorestituição) atendem às especificações do ICOMOS para o grupo de levantamentos rápidos como também ao grupo de levantamentos precisos.

5.3.3 Análise da Fotografia Retificada

A fotografia retificada, como era de se esperar, obteve resultados piores do que os encontrados nos produtos obtidos na forma vetorial (estereorestituição e monorestituição). A fotografia retificada constitui um sistema de projeção central, portanto a medida que o ponto se afasta do plano projetivo, sofre desvios que aumentam gradativamente, dependendo da distância que este se encontra em relação ao plano em que a imagem foi retificada. A retificação foi realizada para uma profundidade de 3 metros, que corresponde à profundidade média dos pontos do plano principal da fachada. A tabela 39 mostra as diferenças encontradas nas coordenadas dos pontos de comparação obtidas entre observações realizadas na fotografia retificada e suas homólogas obtidas topograficamente. A tabela 40 mostra os desvios entre os pontos obtidos na fotografia retificada e seus homólogos obtidos topograficamente.

TABELA 39 - DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDAS POR OBSERVAÇÕES NA FOTOGRAFIA RETIFICADA

Ponto / Plano	X (m)	Y (m)
1-1	-0,001	-0,004
2-1	-0,007	-0,010
3-1	0,000	-0,013
4-1	-0,002	0,003
5-1	-0,004	0,001
6-1	-0,006	0,030
7-1	-0,007	-0,004
8-1	-0,011	-0,012
2-1	0,034	-0,016
2-2	0,033	-0,069
3-2	0,018	-0,022
4-2	-0,001	-0,031
5-2	-0,029	-0,028
6-2	-0,017	-0,015
7-2	0,018	-0,029
8-2	-0,017	-0,025
1-3	0,016	-0,013
2-3	0,025	-0,020
3-3	0,002	-0,051
4-3	0,008	-0,013
5-3	-0,001	-0,064
6-3	-0,009	-0,021
7-3	-0,022	-0,055
8-3	-0,052	-0,052
1-4	0,217	-0,494
2-4	0,214	-0,376
3-4	-0,266	-0,380
4-4	-0,282	-0,478

TABELA 40 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO OBTIDOS A PARTIR DA FOTOGRAFIA RETIFICADA

Ponto/Plano	Desvio (cm)
1-1	0,4
2-1	1,2
3-1	1,3
4-1	0,4
5-1	0,4
6-1	3,1
7-1	0,8
8-1	1,6
1-2	3,8
2-2	7,6
3-2	2,8
4-2	3,1
5-2	4,0
6-2	2,3
7-2	3,4
8-2	3,0
1-3	2,1
2-3	3,2
3-3	5,1
4-3	1,5
5-3	6,4
6-3	2,3
7-3	5,9
8-3	7,4
1-4	54,0
2-4	43,3
3-4	46,4
4-4	55,5

A tabela 41 mostra a média dos desvios encontrados nos pontos de comparação obtidos na fotografia retificada, para cada um dos planos analisados, com seus respectivos desvios padrão.

TABELA 41 - MÉDIAS DOS DESVIOS OBTIDOS NA FOTOGRAFIA RETIFICADA

Plano	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)
1	1,1	0,9
2	3,8	1,7
3	4,2	2,2
4	49,8	5,9

Analisando as tabelas 39, 40 e 41, se verificou a propriedade dos sistemas cônicos: a medida que os pontos se afastam do plano projetivo, sofrem um desvio maior. As figuras 34, 35 36 e 37, mostradas a seguir, representam graficamente os desvios encontrados entre as coordenadas dos pontos de comparação obtidas topograficamente e por observações na fotografia retificada. A figura 34 corresponde aos pontos do primeiro plano (profundidade de 3 metros), que corresponde ao plano principal da fachada. A figura 35 aos pontos do segundo plano (6 cm distante do primeiro), a figura 36 aos pontos do terceiro plano (10 cm distante do primeiro) e a figura 37 aos pontos do quarto plano, que estão a 72 cm distantes do plano principal da fachada.

FIGURA 34 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO
(FOTOGRAFIA RETIFICADA – 1º PLANO)

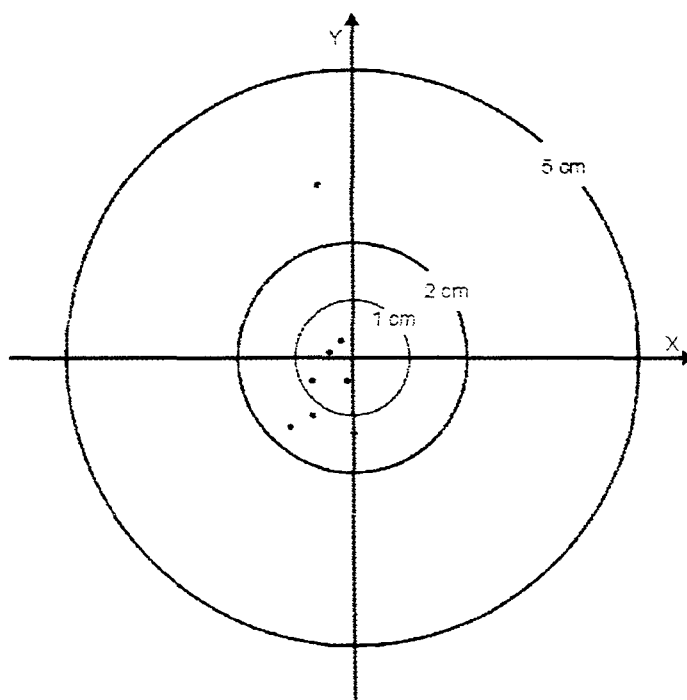


FIGURA 35 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO
(FOTOGRAFIA RETIFICADA – 2º PLANO)

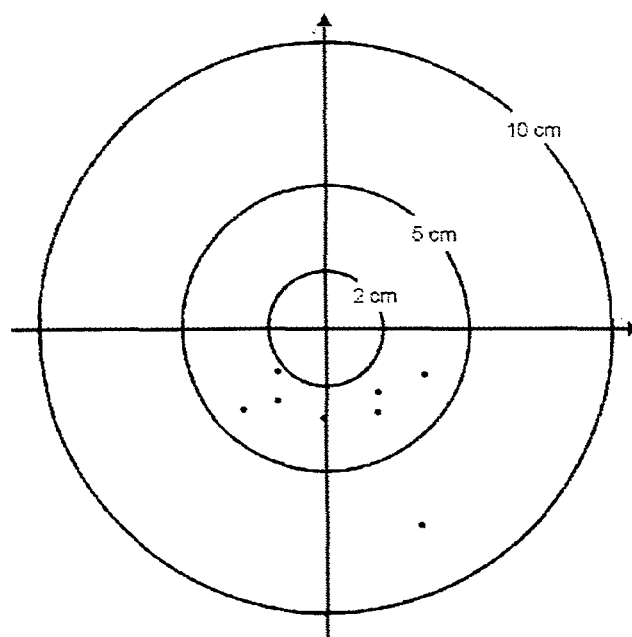


FIGURA 36 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO
(FOTOGRAFIA RETIFICADA – 3º PLANO)

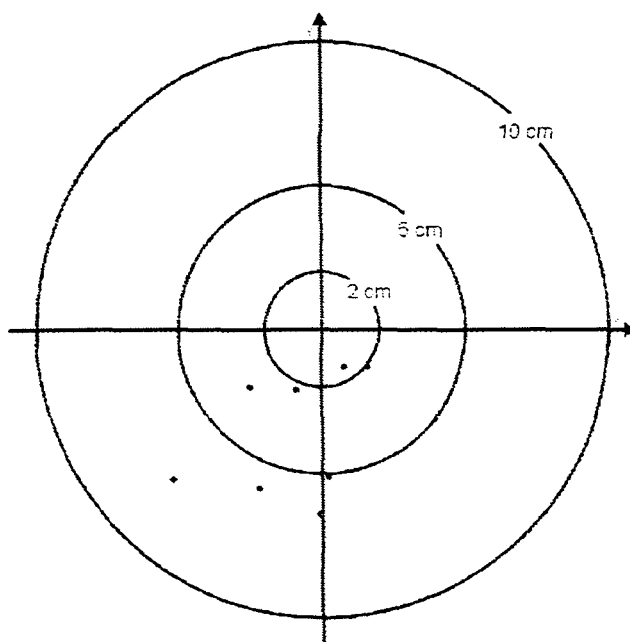
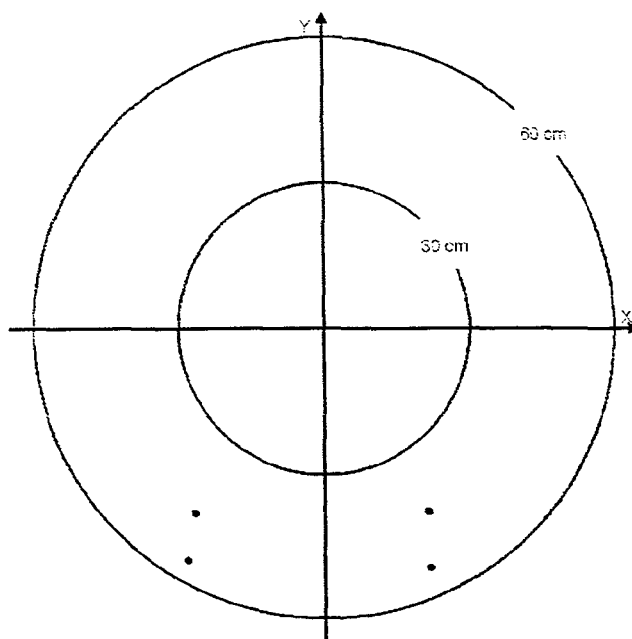


FIGURA 37 - DESVIOS DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO
(FOTOGRAFIA RETIFICADA – 4º PLANO)



Analisando a figura 34, juntamente com os dados mostrados na tabela 41, se observa que os pontos referentes ao plano principal da fachada se desviaram na fotografia retificada, em média 1,1 cm dos seus homólogos obtidos topograficamente. Todos pertencem ao círculo de 2 cm, com exceção do ponto 6-1, que se desviou 3,1 cm.

Os pontos do segundo plano, distantes 6 cm do plano principal, pertencem ao círculo de 5 cm, ficando o desvio médio em 3,8 cm, conforme observado na figura 35, com exceção do ponto 2-2, que está a uma distância de 7,6 cm do seu homólogo obtido topograficamente. Os pontos do terceiro plano analisado, que distam 10 cm do plano principal, se desviaram em média 4,2 cm, sendo mostrados na figura 36 e os pontos mais distantes do plano principal (72 cm), mostrados na figura 37, se desviaram em média 49,8 cm dos seus homólogos obtidos por Topografia.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES QUANTO AOS PONTOS DE CONTROLE

A determinação das coordenadas dos pontos de controle permitiu duas importantes conclusões: a primeira corresponde ao método de cálculo aplicado e a segunda à precisão do equipamento topográfico utilizado no levantamento.

Quanto ao cálculo das coordenadas foram aplicados dois métodos distintos: interseção plana e interseção espacial. A diferença entre eles reside em considerar as direções observadas como retas concorrentes ou reversas. Os resultados mostraram que as diferenças encontradas não interferiram nos procedimentos fotogramétricos, uma vez que houve um deslocamento de todos os pontos do referencial do espaço objeto na mesma ordem de grandeza, direção e sentido.

Com o objetivo de verificar qual deve ser a precisão do equipamento topográfico a ser utilizado para o levantamento dos pontos de controle foram efetuados dois levantamentos distintos através de equipamentos com diferentes precisões angulares: 1" e 10". As diferenças encontradas nas coordenadas obtidas a partir dos dois equipamentos permitiu concluir que, de acordo com as precisões estabelecidas pelo ICOMOS, para levantamentos rápidos e levantamentos precisos, os dois equipamentos são considerados equivalentes.

6.2 CONCLUSÕES QUANTO À FOTOTRIANGULAÇÃO

Com os resultados encontrados na fototriangulação pôde-se avaliar as transformações matemáticas utilizadas na correção do trabalho do filme assim como os pontos de referência utilizados na determinação de seus parâmetros modeladores.

A análise da variância a posteriori permitiu considerar iguais os resultados obtidos a partir de fotocoordenadas corrigidas do trabalho do filme por transformação isogonal e por transformação afim geral, ambas utilizando as quatro marcas do *reseau* na determinação de seus parâmetros modeladores. As variâncias a posteriori calculadas nos dois processamentos pertencem ao intervalo de aceitação do teste de hipóteses, não sendo rejeitadas ao nível de significância estabelecido. Os desvios padrão médios encontrados nas fotocoordenadas foram iguais em ambos processamentos: $3/4$ do valor do *pixel*. Quanto as coordenadas dos pontos do espaço objeto, variaram em média 0,5 mm quando comparadas, reforçando a conclusão de que as duas transformações oferecem a mesma precisão.

O processamento com fotocoordenadas corrigidas do trabalho do filme tendo como referência na determinação dos parâmetros modeladores as quatro marcas principais do *reseau* fotogramétrico obteve variância a posteriori rejeitada ao nível de significância estabelecido no ajustamento, podendo concluir que os resultados encontrados nos processamentos com fotocoordenadas corrigidas utilizando as quatro marcas do *reseau* mais próximas a cada ponto considerado oferece melhor resultado. Os desvios padrão médios dos resíduos das fotocoordenadas foi de aproximadamente 1 *pixel* e as coordenadas do espaço objeto variaram em média 2 mm quando comparadas com as obtidas no processamento a partir de

fotocoordenadas corrigidas tendo as quatro marcas do *reseau* como referência na determinação dos parâmetros.

Mesmo oferecendo resultados inferiores aos obtidos nos processamentos utilizando as quatro marcas do *reseau* mais próximas aos pontos considerados, para as precisões estabelecidas pelo ICOMOS, para levantamentos rápidos (5 cm) e precisos (2 cm), a correção do trabalho do filme tendo as quatro marcas principais como referência na determinação dos parâmetros da transformação pode e deve ser utilizada, possuindo como vantagem a rapidez na obtenção das fotocoordenadas corrigidas, pois o número de observações fotogramétricas é reduzido proporcionalmente ao número de pontos considerados.

6.3 CONCLUSÕES QUANTO AOS PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS

6.3.1 Estereorestituição Digital

Com os resultados obtidos da comparação entre coordenadas obtidas topograficamente (consideradas isentas de erros) com as obtidas a partir da estereorestituição, verificou que os pontos sofreram deslocamentos médios inferiores a 1 cm, atendendo portanto às precisões estabelecidas pelo ICOMOS para levantamentos rápidos e precisos, que pressupõe deslocamentos inferiores a 5 cm e 2 cm, respectivamente.

A estereorestituição possui como vantagem a extração das feições em um único plano gráfico, não necessitando de edição posterior. Qualquer tipo de superfície pode ser restituída, desde as mais simples como as mais complexas, como no caso de monumentos do estilo barroco ou estátuas.

6.3.2 Monorestituição Digital

Os resultados encontrados nas coordenadas obtidas a partir da monorestituição ofereceram precisão semelhante à encontrada na estereorestituição: melhor que 1 cm, atendendo portanto às precisões estabelecidas pelo ICOMOS para levantamentos rápidos e precisos.

O produto da monorestituição, com a precisão acima, só foi obtido “fatiando” a superfície em diferentes planos, paralelos entre si, cada um correspondendo a feições de diferentes profundidades. Para cada plano foi gerado um arquivo gráfico, sendo ao final agrupados e efetuadas edições complementares. A grande vantagem do método está na facilidade operacional, o qual não necessita de profissionais especializados e visão estereoscópica.

6.3.3 Fotografia Retificada

A fotografia retificada apresentou resultado compatível aos levantamentos rápidos e precisos, apenas para os pontos referentes às feições do plano principal da fachada, plano este em que foi retificada. Para os demais pontos, a medida que se afastam do plano principal, sofrem maiores deslocamentos. Para os pontos distantes em até 10 cm do plano principal, a precisão encontrada foi melhor que 5 cm, atendendo ao estabelecido para o grupo de levantamentos rápidos.

A fotografia retificada possui como vantagem a facilidade operacional e constituir uma representação sem abstrações, como no caso dos produtos vetoriais. Oferece ainda informações sobre a cor e a textura dos elementos da superfície dos monumentos.

6.3.4 Ortofoto Digital

A ortofoto digital se apresentou distorcida como pôde ser observado na figura 31. As distorções se devem à deficiência do MDS, causada principalmente pelas descontinuidades da superfície e agravada pela baixa densidade dos pontos de referência. Os problemas encontrados na produção da ortofoto também são apresentados por outros autores como WIEDEMANN (1996), BARATIN et al. (2000) e BOCCARDO & COMOGLIO (2000) , mesmo quando utilizados MDS's mais densos (espaçamento entre linhas e colunas de até 2 cm), concluindo que a geração de ortofotos necessita de estudos mais detalhados para adequar a modelagem da superfície às necessidades do projeto.

6.4 RECOMENDAÇÕES QUANTO AO CADASTRAMENTO DE MONUMENTOS HISTÓRICOS

6.4.1 Considerações Preliminares

As recomendações quanto ao cadastramento de Monumentos Históricos começam com algumas considerações quanto ao trabalho de campo: tomada das fotografias e levantamento dos pontos de controle. Seja qual for a finalidade a que se destina o levantamento arquitetônico o trabalho de campo deve ser planejado cuidadosamente, levando em consideração as características do monumento (e sua vizinhança) e a escala do trabalho. Fatores que devem ser considerados: possíveis posições das estações da tomada das fotografias; a melhor hora do dia para tomar as fotografias, de acordo com a iluminação; fluxo de tráfego de pedestres e de veículos automotores; e a escolha dos pontos de apoio.

Os pontos de apoio devem estar distribuídos por toda a superfície fotografada, contemplando feições de diferentes profundidades. Quanto ao método de cálculo de coordenadas se recomenda a utilização do método de interseção plana por se apresentar mais simples quando comparado ao método de interseção espacial. Para as necessidades dos grupos de levantamentos rápidos e precisos, equipamentos topográficos com precisão angular igual ou superior a 10" podem ser utilizados, não havendo necessidade de pontos pré-sinalizados.

Quanto à correção do trabalho do filme as transformações afim geral e isogonal apresentaram resultados semelhantes, podendo as duas serem utilizadas para este fim. A transformação isogonal é um caso particular da afim geral onde se considera apenas dois parâmetros de translação, um de rotação e um de escala, sendo portanto mais simples de ser utilizada. O uso das 4 marcas do *reseau* mais próximas ao ponto como referência na determinação dos parâmetros modeladores das transformações fornece melhor desempenho quando comparada com as 4 marcas principais da fotografia (consideradas como marcas fiduciais), porém requer um número de observações fotogramétricas muito superior (para cada ponto são realizadas 4 observações contra apenas 4 para toda a fotografia quando utilizadas as marcas fiduciais). Recomenda-se portanto o uso das 4 marcas principais da fotografia na modelação dos parâmetros definidores das transformações.

6.4.2 Produto Fotogramétrico

A recomendação do produto fotogramétrico deve considerar o grau de precisão exigido no levantamento, assim como as características da superfície dos monumentos.

Se a superfície do monumento for praticamente plana, com detalhes em baixo relevo (até 10 cm) e o levantamento requerer precisão de até 5 cm (levantamentos rápidos) a fotografia retificada pode ser a escolhida, pois além de sua simplicidade, as feições são representadas sem as “abstrações” existentes na restituição fotogramétrica.

Para levantamentos precisos, a recomendação é pela utilização da estereorestituição ou monorestituição. o caso da superfície permitir o “fatiamento”, a monorestituição deverá ser preferida pela sua simplicidade e rapidez, enquanto que, se a superfície apresentar detalhamentos a estereorestituição deverá ser a escolhida.

6.5 RECOMENDAÇÕES À INVESTIGAÇÕES CIENTÍFICAS

Um estudo de adequação da modelagem de superfícies com o propósito de eliminar os problemas causados por descontinuidades e sombras, na geração de ortofotos, bem como o desenvolvimento de técnicas e algoritmos para geração de MDS's compatíveis com a representação da superfície através da ortoimagem.

Realizar e avaliar levantamentos com câmeras não métricas de pequeno formato, como também a partir de câmeras digitais de diferentes resoluções geométricas, comparando as precisões alcançadas com as estabelecidas pelo ICOMOS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-HAMBALI, Nedal N.; EL-HAKIM, S.; TESKEY, W. F.; RADOVANOVIC, R. S.; CHAPMAN, M. A. Assessment of laser scanning system for deformation measurements. In **International archives of photogrammetry and remote sensing**. Amsterdam: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII (B5), 2000. p. 9-16.
- ALMAGRO, A.; PATIAS, A. & WALDHÄUSL, P. The CIPA "O Wagner Pavillion" test. In: **International archives of photogrammetry and remote sensing**. Vienna: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXI (B5), 1996. p. 463-470.
- ALMEIDA, Maria do Carmo Baltar Esnaty de; SANTANA, Mariely Cabral de. Levantamento gráfico das ruínas da casa da Torre de Garcia D'Ávila. In **Graphica 2000**. Ouro Preto: IV International Congress on Engineering Graphics for Arts and Technical Drawing & 14º Simpósio Nacional de Geometria Descritiva e Desenho Técnico, CD-Rom, 2000.
- ANDRADE, José Bittencourt de. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998. 242p.
- ANDRADE, José Bittencourt de; OLIVAS, Mary A. Azevedo. **Calibração de câmeras aerofotogramétricas**. Boletim da UFPR, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1981. Curitiba, n. 26 p. 01-39.
- ATKINSON, K. B. Instrumentation for non-topographic photogrammetry. In: KARARA, H. M. **Non-topographic photogrammetry**. Falls Church, Virginia: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1989. p.15-35.
- BARATIN, Laura; BITELLI, Gabriele; UNGUENDOLI, Marco; ZANUTTA, Antonio. Digital orthophoto as a tool for the restoration of monuments. In **International archives of photogrammetry and remote sensing**. Amsterdam: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII (B5), 2000. p. 62-69.
- BLACHUT, Teodor J.; CHRZANOWSKI, Adam; SAASTAMOINEN, Jouko K. **Urban Surveying and Mapping**. New York: Springer-Verlag, 1979. 372p.
- BOCCARDO, Piero; COMOGLIO, Giuliano. New methodologies for architectural photogrammetric survey. In **International archives of photogrammetry and remote sensing**. Amsterdam: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII (B5), 2000. p. 70-75.
- BROWN, Duane. C. An advanced plate reduction for photogrammetric cameras. In: **Report, Air Force Cambridge Research Laboratories**. USA: 1964.

- CARBONELL, Maurice. Architectural Photogrammetry. In: KARARA, H. M. **Non-topographic photogrammetry**. Falls Church, Virginia: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1989. p.321-347.
- CARTA DE VENEZA. Carta internacional sobre conservação e restauração de monumentos e sítios. In: **II Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos dos Monumentos Históricos**. Veneza: maio, 1964.
- CARVALHO, Cristina Wolff de; WOLFF, Silvia Ferreira Santos. Arquitetura e fotografia no século XIX. In: **Fotografia: usos e funções no século XIX**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1998. p. 131-172.
- CONRADY, A. E. Decentered Lens System. In: **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. 1919. n.79 – p. 384-390.
- FAIG, W. Non-metric and semi-metric cameras: data reduction. In: **Non-topographic photogrammetry**. Falls Church, Virginia: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1989. p.71-79.
- FRAGASSI, Antonio de Padua Mendonça. **Desenvolvimento e implementação de um aplicativo para extração de feições arquitetônicas sobre imagens digitais**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba: UFPR, 1998. 223p.
- GALO, Maurício. **Calibração e aplicação de câmaras digitais**. Dissertação (mestrado em Ciências Geodésicas). Curitiba: UFPR, 1993. 151p.
- GEMAEL, Camil. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 1 ed. Curitiba: UFPR, 1994.
- GOMES, Camillo José Martins et. al. Tower Castle of Garcia D'Avila – First outcomes for the restoration procedures. In: **International archives of photogrammetry and remote sensing**. Viena: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- GOMES, Camillo José Martins et. al. Utilização da fotogrametria terrestre na conservação de monumentos históricos – levantamento fotogramétrico do Cristo Redentor – Rio de Janeiro. **Anais do XIII Simpósio do Comitê Internacional de Fotogrametria Arquitetônica – CIPA**. Krakow – Poland, 1990.
- GOMES, Camillo José Martins; PRADO, Walter da Silva; ERWES, Herbert; KOATZ, Gilson Dimenstein. Um projeto fotogramétrico no Brasil: a utilização do software PhotoModeler. In **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Cartografia**. Recife: Sociedade Brasileira de Cartografia, 1999. CD-Rom.
- GONÇALVES, Antônio et. al. **Casa de Inácio de Paula França**. Trabalho de Graduação Curitiba: UFPR, 1986.

- IBIAPINA, D. S.; SILVA, I; MANZOLEO NETO, O. Método topográfico para o posicionamento tridimensional de um ponto. In: **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Cartografia**. Rio de Janeiro: SBC, 1993. p. 261-267.
- JAUREGUI Luis M.; JAUREGUI, Manuel. Terrestrial photogrammetry applied to architectural restoration and archaeological surveys. In **International archives of photogrammetry and remote sensing**. Amsterdam: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII (B5), 2000. p. 401-405.
- KARARA, H. M. (Ed.) **Non-topographic photogrammetry**. 2. Ed. Virgínia: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Falls Church, 1989. 445p.
- LANDES, S.; BÄHR, H. P. & RINGLE, K. Architectural photogrammetry and picture processing for acquisition and documentation of brazilian town ensemble. In: **International archives of photogrammetry and remote sensing**. Vienna: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXI (B5), 1996. p. 309-312.
- LEAL, F. M. São Miguel das Missões – estudo de estabilização e conservação das ruínas da Igreja. In: **Revista do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional**. Rio de Janeiro: SPHAN, 1984. n.19.
- LINARTH, Casemiro. Caminhos da história. In: **Revista do CREA/PR**. Curitiba: CREA, 1999. n.7. ano 2. p. 18-24.
- LUGNANI, João Bosco. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: UFPR, 1987. 134 p.
- MARTINS, Jani Mara; RENUNCIO, Luiz Ernesto; LOCH, Carlos. Restituição digital da Igreja São João Batista. In: **Anais do IV Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1998. CD-Rom.
- MEDINA, Alex Soria; SILVA, Claudia Vergetti de A.; MENDONÇA, Francisco Jaime B; ARAÚJO, Mércia Pedrosa de. Estudo fotogramétrico para restauração de monumentos. In: **Anais do Seminário e Work Shop de Geoprocessamento**. Recife: 1991. p. 05/01-05/06.
- MERCHANT, Dean C. **Analytical photogrammetry: theory and practice – Part I**. Columbus: Department of Geodetic Science. The Ohio State University, 1979.
- MITISHITA, Edson Aparecido. **Monorestituição digital de aerofotos, associada com sistema de computação gráfica C.A.D., para fins de mapeamento na área florestal**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR, 1997. 253p.

- NEVES, Patrícia Silveira; VIEIRA, Milton Luiz Horn. Restauração e preservação quanto às cores originais da Casa do Barão. In **Graphica 2000**. Ouro Preto: IV International Congress on Engineering Graphics for Arts and Technical Drawing & 14º Simpósio Nacional de Geometria Descritiva e Desenho Técnico, CD-Rom, 2000.
- OLIVAS, Mary Angélica de Azevedo. **Calibração de câmaras fotogramétricas**. Dissertação (mestrado em Ciências Geodésicas). Curitiba: UFPR, 1980.
- PALLASKE, Rainer; MARTEN, Werner; MAUELSHAGEN, Landolf. Digital orthophoto-system for architecture representation. In: **International archives of photogrammetry and remote sensing**. Washington: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXIX (B5), 1992. p. 67-73.
- RITCHIE, W.; WOOD, M.; WRIGHT, R.; TAIT, D. **Surveying and mapping for fields scientists**. New York: Logman Scientific, 1988.
- SAMPAIO, Suzanna. Aspectos urbanos, históricos e legais da preservação do Brasil. In: **Revista do ICOMOS-Brasil**. São Paulo: ICOMOS/BR, 1998. p. 8-17.
- SILVA, Daniel C. **Considerações práticas em fotogrametria a curta distância aplicada ao levantamento de um tanque e a questão de precisão e exatidão**. Dissertação (mestrado em Ciências Geodésicas). Curitiba: UFPR, 1995.
- TOMMASELLI, A. M. G. Calibração de câmeras digitais. In: **Anais do XV Congresso Brasileiro de Cartografia**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Cartografia, 1991. p. 239-249.
- WIEDEMANN, Albert. Digital orthoimages in architectural photogrammetry using digital surface models. In: **International archives of photogrammetry and remote sensing**. Vienna: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXI (B5), 1996. p. 605-615.
- WONG, K. W. Basic mathematics of photogrammetry. In: **Manual of Photogrammetry**. 4 ed. Falls Church: American Society of Photogrammetry, 1980. p. 37-102.

ANEXO

GLOSSÁRIO FOTOGRAMÉTRICO

Ângulos de Euler – Ângulos que relacionam dois sistemas de coordenadas tridimensionais.

Dextrógiro – Sentido dos ponteiros do relógio.

Distância Focal – Denominação dada a distância entre o centro ótico da câmera e o plano da imagem.

Distorção Descentrada – Deslocamento na imagem causado pelo não alinhamento dos eixos ópticos das lentes que compõe uma objetiva.

Distorção Radial Simétrica – Parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente.

Estereoscópio – Instrumento ótico que permite observar simultaneamente duas fotografias de um mesmo objeto, tomadas a partir de pontos distintos, formando um modelo tridimensional

Fotografia Retificada – Fotografia cuja reta definida pela distância focal é paralela ao eixo Z do espaço objeto.

Modelo Estereoscópico – Reconstituição ótica de um objeto, em três dimensões, por meio de superposição de duas imagens tomada de pontos diferentes.

Monocomparador – Instrumento de precisão destinado a medir coordenadas em uma única fotografia.

Monorestituição – Restituição realizada através de observações em uma única fotografia.

Orientação Externa - Permite recuperar a posição e a atitude de cada fotografia em relação ao sistema de coordenadas do espaço objeto.

Orientação Interior - Consiste da recuperação de seu feixe perspectivo através das coordenadas calibradas das marcas fiduciais; coordenadas do ponto principal; distância focal calibrada; e os parâmetros das distorções radial simétrica e descentrada.

Ortofoto – Fotografia em que o centro perspectivo é deslocado para o infinito

Ponto Principal – A base da perpendicular, partindo do centro de perspectiva interior para o plano da fotografia.

Pontos de Apoio – Conjunto de pontos determinados geodesicamente ou topograficamente, com a finalidade de orientar as fotografias.

Reflexão – Transformação matemática que consiste em mudar o sentido de um eixo de coordenadas.

Reseau – Conjunto de marcas associadas à lente da câmera, que permitem a orientação interior da fotografia.

Restituição – Reconstituição de um objeto ou superfície a partir de observações em fotografias.

Visão Estereoscópica – Efeito tridimensional que se obtém a partir de observação simultânea em duas fotografias obtidas do mesmo objeto, a partir de pontos diferentes.